
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

**Návrh algoritmu pro řízení tvarových korekcí
5-ti osého obráběcího centra**

**The Design of the Control Algorithm for
Corrective Manufacturing of 5 axis Machining
Centre**

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 1802T007 – Informační technologie

Autor: **Bc. Jiří Beneš**
Vedoucí práce: Ing. Vít Lédl, Ph.D.
Konzultant: Ing. František Procháška, Ph.D.

V Liberci 12. 5. 2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří Beneš**
Osobní číslo: **M13000172**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Informační technologie**
Název tématu: **Návrh algoritmu pro řízení tvarových korekcí 5-tiosého obráběcího centra**
Zadávající katedra: **Ústav nových technologií a aplikované informatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte literární rešerši z oblasti zpracování dat jakožto vstupu pro řídicí algoritmy CNC zařízení.
2. Otestujte zařízení přestavěné v rámci diplomového projektu na sérii optických elementů.
3. Proveďte měření odchylek tvarů vyprodukovaných vzorků a analýzu zdrojů tvarových chyb.
4. Navrhněte algoritmus pro řízení tvarových korekcí.
5. Dosažené výsledky zhodnoťte.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: cca 60 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

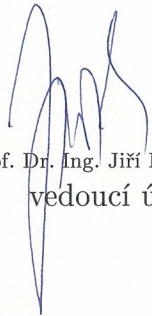
- [1] ROWE, W., Principles of modern grinding technology, Second edition. Amsterdam: William Andrew, 2014, xxxvi, 437 pages. ISBN 0323242715.
- [2] HANÁK, Ján., C# 3.0: programování na platformě .NET 3.5, Vyd. 1. Brno: ZonerPress, 2009, 282 s. Encyklopedie ZonerPress. ISBN 978-80-7413-046-5.
- [3] ŠTULPA, Miloslav., CNC: programování obráběcích strojů, 1. vyd. Praha: Grada, 2015, 240 s. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [4] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ., Statistická analýza experimentálních dat, Vyd. 2., upr. a rozš. Praha: Academia, 2004, 953 s. ISBN 80200-1254-0.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vít Lédl, Ph.D.**
TOPTEC, Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., vý-
konný ředitel

Datum zadání diplomové práce: **20. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan




prof. Dr. Ing. Jiří Maryška, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 20. října 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 12.5.2016

Podpis



Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi jakkoli pomohli při zpracování této diplomové práce. Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Vítu Lédlovi, Ph.D. a konzultantovi práce panu Ing. Františku Procháskovi, Ph.D. a dále pak všem kolegům z Turnovského výzkumného centra TOPTEC za jejich vedení, cenné rady a poskytnuté materiály.

Abstrakt

Práce se zabývá tvorbou korekčních dat při generování sférických a asférických ploch. Generování je prováděno na přestavěné 5osé frézce, pro kterou je nutno generovat řídicí programy. Při procesu generování mohou vznikat náhodné chyby. Proto je třeba obrobky měřit a chyby korigovat. Je zde tedy řešeno měření vygenerovaných ploch na souřadnicovém měřicím stroji Mitutoyo Legex 744 a návrh následné metody zpracování naměřených dat pomocí prokládání polynomu n -tého řádu. Data jsou zpracovávána aplikací Matlab, konkrétně modulem CFTool. Tato metoda je dále testována a následně je celý experiment vyhodnocen.

Klíčová slova

sférická, asférická, plocha, korekce, korekční data, broušení, generování tvaru

Abstract

The work deals with the creation of correction data when generating spherical and aspherical surfaces. Generation is performed on the converted 5-axis milling machine, for which it is necessary to generate control programs. In the process of generating surfaces may be formed random errors. Hence the need to measure workpieces, and errors corrected. There is thus solved a measurement of generated surface on coordinate measuring machine Mitutoyo LEGEX 744 and draft methods of data processing by using polynomial of n th order. The measured data are processed by Matlab, specifically CFTool module. This method is further tested and subsequently the experiment evaluated.

Key words

spherical, aspherical, surface, correction, correction data, grinding, generating shape

Obsah

| | |
|-------|--|
| Úvod | 12 |
| 1 | CNC stroje a jejich řízení 13 |
| 2 | Analýza a úprava dat 15 |
| 2.1 | Aproximace a interpolace 15 |
| 2.1.1 | Metoda nejmenších čtverců 16 |
| 2.2 | Filtrace dat 16 |
| 2.2.1 | FIR filtry 19 |
| 2.2.2 | IIR filtry 19 |
| 2.2.3 | Využití filtrace 21 |
| 2.3 | Statistické metody zpracování dat 21 |
| 2.3.1 | SSE 21 |
| 2.3.2 | RMSE 21 |
| 3 | Optické plochy 23 |
| 3.1 | Sférické plochy 23 |
| 3.2 | Asférické plochy 23 |
| 3.3 | Způsoby obrábění na CNC 24 |
| 3.3.1 | Hrnkové nástroje 24 |
| 3.3.2 | Kotoučové nástroje 25 |
| 3.3.3 | Hrubost brusného zrna 26 |
| 3.3.4 | Vazby na brusných nástrojích 27 |
| 3.3.5 | Opotřebení nástroje 29 |
| 4 | Měření 30 |
| 4.1 | Bezkontaktní měření 30 |
| 4.1.1 | Metoda geometrické optiky 30 |
| 4.1.2 | Interferometrická metoda 30 |
| 4.2 | Kontaktní měření 31 |
| 4.2.1 | Souřadnicové měřicí stroje 32 |
| 5 | Použité technologie, aplikace a postupy 33 |
| 5.1 | Mitutoyo Legex 774 33 |
| 5.2 | Metoda upevnění měřené plochy 34 |
| 5.3 | Metoda měření 35 |

| | | |
|--------------------------|--|----|
| 5.4 | Kompenzace náklonu | 35 |
| 5.5 | Proložení dat v aplikaci Matlab | 37 |
| 5.6 | Stroj TOS FNG 50 | 40 |
| 5.6.1 | Představení stroje TOS FNG 50 | 40 |
| 5.7 | Generování kódu G-CODE | 42 |
| 5.7.1 | Úprava aplikace | 43 |
| 5.8 | Zpracování naměřených dat..... | 43 |
| 5.9 | Metoda tvorby korekčních dat..... | 44 |
| 6 | Testy broušení a měření..... | 47 |
| 6.1 | První testy | 47 |
| 6.2 | Testy metody měření | 49 |
| 6.3 | Test opakovaného broušení | 53 |
| 6.4 | Testování výroby ploch s různými parametry | 56 |
| 6.4.1 | Plocha s poloměrem 558,6 mm | 56 |
| 6.4.2 | Plocha s poloměrem 1002,6 mm | 59 |
| 6.4.3 | Vzorek o průměru 320 mm..... | 62 |
| 6.5 | Vady odhalené při testování | 69 |
| Závěr | 70 | |
| Citovaná literatura..... | | 71 |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| obr. 1 Obecné schéma CNC stroje [2] | 14 |
| obr. 2 Hrnkový nástroj | 25 |
| obr. 3 Znázornění procesu broušení hrnkovým nástroje ve stroji OptoTech MCG 100 | 25 |
| obr. 4 Kotoučový nástroj firmy DOPA..... | 26 |
| obr. 5 Schéma pohybu kotoučového nástroje při procesu | 26 |
| obr. 6 Porovnání jednotlivých používaných norem | 27 |
| obr. 7 Stroj Mitutoyo Legex 774 [20] | 33 |
| obr. 8 Tříbodový systém držení obrobku při měření | 34 |
| obr. 9 Obrobek upevněný k tmelce, vkládaný do měřicího stroje | 34 |
| obr. 10 Tmelka - část určená k lepení k obrobku..... | 36 |
| obr. 11 Tmelka - část určená k upínání do obráběcího stroje | 36 |
| obr. 12 Znázornění měřené válcovité boční strany obsužným softwarem stroje Mitutoyo Legex 774 | 36 |
| obr. 13 Okno modulu CFTool aplikace Matlab | 37 |
| obr. 14 Formulář pro zadání vlastního předpisu požadované funkce | 38 |
| obr. 15 Panel zobrazující odchylku dat (černá křivka) a nominální funkce (modrá křivka v pozadí) | 38 |
| obr. 16 Panel zobrazující rezidua po proložení..... | 39 |
| obr. 17 Panel zobrazující data výsledku proložení (parametry proložené funkce)..... | 39 |
| obr. 18 Schéma stroje TOS FNG 50, 1) obráběcí nástroj, 2) lože s upínacím stolkem.. | 41 |
| obr. 19 Ukázka úpravy stroje, vyobrazen je pohon NSK (spodní část), dále obrobek a obráběcí nástroj..... | 42 |
| obr. 20 Aplikace LensGEN vytvořená v předchozí ročníkové práci | 42 |
| obr. 21 Proložení naměřených dat nominální funkcí, ve vrchní části zobrazení tvaru plochy a ve spodní části zobrazení residuí | 44 |
| obr. 22 Proložení residuí polynomem n-tého řádu se záměrem získat informaci o tvaru residuí | 45 |
| obr. 23 Proložení poloviny dat (obě poloviny zprůměrovány do jedné) polynomem n- tého řádu | 46 |
| obr. 24 Znázornění metody měření sférických ploch pomocí kroužku | 48 |
| obr. 25 Znázornění odchylky způsobené chybným zadáním asférické funkce | 49 |

| | |
|--|----|
| obr. 26 Nabroušená plocha s poloměrem 233,7mm před korekcí odchylek..... | 49 |
| obr. 27 Residua proložená polynomem 5. stupně | 50 |
| obr. 28 Výsledná residuální data po korigování chyb | 50 |
| obr. 29 Residuální data 1. broušené plochy | 55 |
| obr. 30 Residuální data 2. broušené plochy | 55 |
| obr. 31 Residuální data 3. broušené plochy | 55 |
| obr. 32 Residuální data 4. broušené plochy | 56 |
| obr. 33 Residuální data 5. broušené plochy | 56 |
| obr. 34 Residuální data měřené plochy s poloměrem 558,6 mm před korekcí..... | 57 |
| obr. 35 Residua korigované plochy s poloměrem 558,6 mm | 58 |
| obr. 36 Pro názornost, residua proložena polynomem, který znázorňuje tvar odchylky | 59 |
| obr. 37 Residua vyrobené plochy s poloměrem 1002,6 mm před korekcí ochylky tvaru | 60 |
| obr. 38 Proložení residuí polynomem 7. řádu..... | 60 |
| obr. 39 Residua výsledné korigované plochy s poloměrem 1002,6 mm | 61 |
| obr. 40 Residua výsledné plochy proložena polynomem pro odhalení tvarové odchylky | 62 |
| obr. 41 Residua broušené rovinné plochy bez korekcí | 63 |
| obr. 42 Residua získaná měřením výsledné rovinné plochy..... | 64 |
| obr. 43 Residua na ploše s poloměrem 600 mm před korekcí | 65 |
| obr. 44 Ukázka následků chybného postupu při tvorbě korekčních dat | 66 |
| obr. 45 Rezidua výsledné plochy po užití chybně vytvořených korekčních dat..... | 67 |
| obr. 46 Ukázka správně upravených dat pro prokládání | 68 |
| obr. 47 Výsledná plocha po užití postupu dělení dat při tvorbě korekcí | 68 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| tab. 1 Velikost zrna jednotlivých hrubostí dle ISO 6106..... | 27 |
| tab. 2 Příklad měřicí halvy dotykového profilometru Form TalySurf i120 [18] | 31 |
| tab. 3 Výsledky testu opakovatelnosti měření | 52 |
| tab. 4 Výsledky testu reprodukovatelnosti ploch | 54 |
| tab. 5 Výsledky výroby tří kusů plochy o poloměru 558,6..... | 58 |
| tab. 6 Tabulka výsledků výroby tří ploch s poloměrem 1002,6 mm..... | 62 |
| tab. 7 Porovnání výsledků broušení bez a s korekcí chyby..... | 65 |
| tab. 8 Tabulka výsledků testu výroby plochy o poloměru 600 mm na vzorku o průměru 320 mm | 69 |

Úvod

Výroba optických elementů větších rozměrů je i v dnešní době značně problematická. Převážná většina strojů určených k výrobě optických ploch má velmi přísné limity na jejich rozměry. Výzkumné centrum TOPTEC sídlící v Turnově disponuje dvěma stroji na generování optických ploch. Ty jsou ale určeny na výrobu menších optických ploch. S cílem vyřešit tento problém byla v rámci předchozí ročníkové práce provedena úprava jednoho z dalších strojů, kterými centrum disponuje. Následně byla vyvinuta aplikace, určená ke generování řídicích programů pro tento stroj. Protože se však jedná o velmi přesné broušení skla, je nutné vyrobené plochy měřit a korigovat chyby, které do procesu zanášejí různé vlivy.

Cílem diplomové práce je tedy otestovat upravený stroj a aplikaci vyvinutou během předchozí ročníkové práce na sérii ploch. Tyto plochy následně změřit a vyvinout metodu zpracování dat v závislosti na jejich povaze, následně výsledky zhodnotit. K měření byl zvolen měřicí souřadnicový stroj Mitutoyo Legex 774, kterým centrum TOPTEC disponuje. Tento stroj je běžný souřadnicový měřicí stroj určený ke snímání trojrozměrných dat, a protože není přímo určen k měření rotačně symetrických ploch, je nutno vyvinout metodu upevnění obrobku a dále pak najít nejvhodnější metodu měření. Následně je nutno vyvinout metodu zpracování dat s cílem je využít ke korigování chyb.

Teoretická část této práce se zabývá obecnou strukturou CNC strojů. Dále následuje zpracování dat, zabývající se filtrováním a okrajový rozbor problematiky optických ploch a jejich broušením. Dále je součástí teoretické části kapitola o měření těchto ploch a o přístrojích, které jsou k tomuto účelu užívány.

V experimentální části této práce je pak rozbor použitých strojů, metod měření a představení aplikace využitá ke generování řídicího kódu. Následuje návrh metody úpravy naměřených dat pro následné využití ke korigování tvarové chyby předešlého procesu.

Poslední částí práce je testování této metody a zhodnocení výsledků dosažených při broušení testovací série.

1 CNC stroje a jejich řízení

Nejprve je nutno si říci, co je to číslíkově řízený stroj neboli CNC (Computer Numerical Control). Tímto názvem se označuje skupina strojů, která má jednu charakteristickou vlastnost, o ovládání celého procesu se stará řídicí systém na základě dat načítaných z programu. Ten je zadán ve formě alfanumerických řetězců. Tento program je psán ve formátu, který je pro daný stroj srozumitelný.

Řídicí systém se tedy stará nejen o řízení pohybu nástroje, ale též o řízení pohybu obrobku a o veškeré pomocné funkce. Řídicí systém má tedy na starost například ovládání všech pohybů jednotlivých os (směr, rychlost, zrychlení), ovládání nástroje (otáčky, směr) a pomocných funkcí (chladicí kapalina, výměna nástrojů, ofukování různých dosedacích ploch). [1]

Řídicí kód

Stroj je řízen pomocí programů vytvářených operátorem. Tento program je psán ve specifickém jazyce. Pro možnost kompatibility programů pro různé stroje, byl vytvořen jazyk nazvaný G-kód. Operátor může za použití předdefinovaných klíčových slov vytvořit řídicí program v tomto jazyce a následně ho načíst do stroje a spustit.

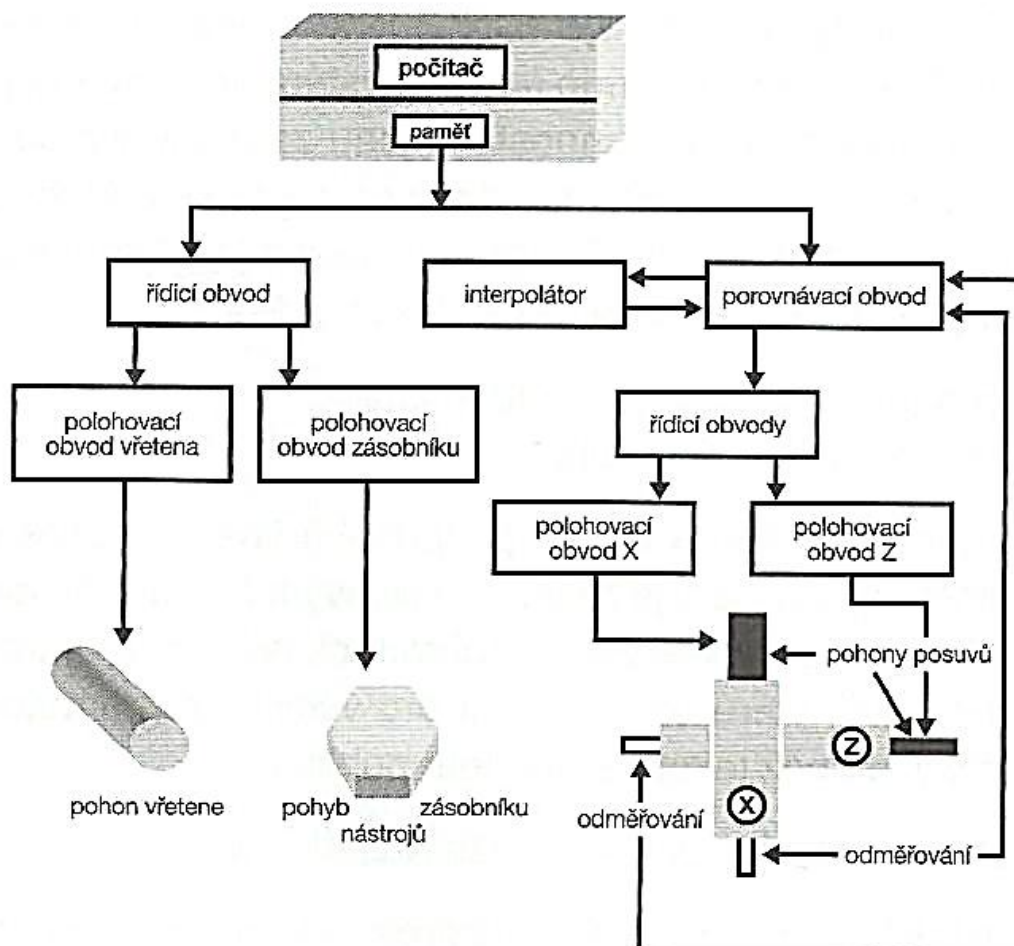
Ačkoli tento jazyk podporuje převážná většina CNC strojů, výrobci (např. Siemens AG, Yamazaki Mazak či HEIDENHAIN s.r.o.) řídicích systémů pro CNC stroje upřednostňují své vlastní jazyky.

Pro všechny systémy a stroje je však několik prvků stejných. Hodnoty pro pozicování jsou vždy zadávány jako celá nebo desetinná čísla (s pevným počtem desetinných míst).

Obecná struktura stroje

Na obr. 1 je znázorněno obecné schéma CNC stroje. Každý stroj disponuje počítačem, sloužícím pro komunikaci s obsluhou. Pomocí něj jsou nahrávány řídicí kódy do stroje. Následuje řídicí obvod (PLC) starající se o samotné řízení pohybů a příslušenství.

Dále stroj disponuje obvody pro výpočet interpolace, ať už kruhové či lineární. Předposlední částí systému jsou obvody hlídající pozici stroje následované řízením pohybu jednotlivých os.



obr. 1 Obecné schéma CNC stroje [2]

2 Analýza a úprava dat

2.1 Aproximace a interpolace

Při aproximaci a interpolaci se provádí nahrazení původní funkce $f(x)$, zadané jako $\{x_i, f(x_i)\}$, kde $i=1, \dots, n$, aproximující funkcí $g(x)$. Tato funkce se volí jako lineární kombinace elementárních funkcí $g_i(x)$ [3]

$$g(x) = \sum_{j=1}^m c_j * g_j(x) .$$

Příčemž elementární funkcí je v tomto případě myšlen např. polynom, racionální funkce či funkce exponenciální. Při aproximaci je volen její stupeň, ten se obvykle vyjadřuje jako vzdálenost funkcí $g(x)$ a $f(x)$.

Zvláštním případem aproximace je pak *interpolace*. Při interpolaci musí funkce $g(x)$ procházet definovanými body ξ_i , $i=1, \dots, n$ (*uzlové body interpolace*) a obě funkce $(g(x), f(x))$ musí být v těchto bodech spojitě ve funkčních hodnotách a hodnotách zvolených derivací

$$f^{(j)}(\xi_i) = g^{(j)}(\xi_i), \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 0, \dots, r_i .$$

Tato metoda se užívá hlavně k transformaci nespojitých diskrétních dat na spojitě funkce.

Při použití interpolace závislosti, je nutno aby byly hodnoty osy x deterministické a hodnoty osy y jim odpovídající . V převážné většině případů jsou však hodnoty x_i volené a hodnoty y_i jsou následně experimentálně měřeny. To do měřených dat zanáší náhodné chyby. Předpokládá se tedy aditivní působení chyb typu

$$y_i = g(x_i) + \varepsilon_i .$$

V technické praxi se aproximace používá hlavně k eliminaci chyb ε_i . [3]

2.1.1 Metoda nejmenších čtverců

Často používaným aparátem aproximace je metoda nejmenších čtverců, jedna z regresních metod. Při aproximaci pomocí metody nejmenších čtverců, se snažíme nalézt takovou funkci, která splňuje podmínku, že její součet kvadrátů odchylek od aproximovaných dat je nejmenší.

Celý problém můžeme definovat jako odhad parametrů regresního modelu

$$Y_i = f(x_{i1}, \dots, x_{il}; \beta_1, \dots, \beta_k) + e_i, i = 1, \dots, n,$$

pak *metodou nejmenších čtverců* nazveme hodnoty $b = (b_1, \dots, b_k)'$ parametru

$\beta = (\beta_1, \dots, \beta_k)'$, které minimalizují *součet čtverců*

$$S(\beta_1, \dots, \beta_k) = \sum_{i=1}^n (Y_i - f(x_{i1}, \dots, x_{il}; \beta_1, \dots, \beta_k))^2.$$

Za předpokladu hladkosti S je tento odhad řešením soustavy *normálních rovnic*

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_i} = 0, i = 1, \dots, k.$$

Potom hodnoty $\hat{Y}_i = f(x_{i1}, \dots, x_{il}; \beta_1, \dots, \beta_k), i = 1, \dots, n$, označujeme jako *vyrovnané hodnoty* pozorování $Y_i, i = 1, \dots, n$. [4]

2.2 Filtrace dat

Číslicové filtrování dat umožňuje odstranění šumu z naměřených hodnot. Slovem šum se označuje část signálu, která je neúčinná. Je to nevyžádaný projev okolního prostředí, či vedlejších vlastností měřeného objektu, který je velice těžké potlačit, aniž by došlo k narušení dat. Šumem může být označen například hluk na pozadí audio nahrávky, zrnění v obrazových datech způsobené nedostatkem světla nebo mikrodrsnost měřeného povrchu.

Nejprve je nutno definovat, co je to číslicový filtr. Je to diskretní systém (matematický operátor) jehož vstupem je diskretní signál $x[n]$. Diskretní systém tento vstup transformuje na výstupní diskretní signál $y[n]$. Můžeme jej zapsat jako

$y[n]=T(x[n])$. Běžně je $y[n]$ nazýváno odezvou diskrétního systému na vstupní signál $x[n]$.

Každý diskrétní systém lze definovat pomocí *diferenční rovnice*, jakožto závislost výstupního signálu na signálu vstupním,

$$y[n] = \sum_{k=0}^q a[k]x[n-k],$$

$a[k]$ je konstanta definující systém.

Nečastěji používanou skupinou diskrétních systémů jsou tzv. LTI (Linear time-invariant) systémy. Tyto systémy jsou lineární a invariantní vůči posunu. [5] Důležitou charakteristikou LTI systémů je jejich *impulzní odezva* $h[n]$. Ta je definována jako odezva LTI systému na jednotkový (Diracův) impuls $\delta[n]$. Platí tedy

$$h[n] = \sum_{k=0}^q a[k]\delta[n-k],$$

$a[k]$ je konstanta definující systém.

Podle toho se pak systémy dělí na systémy s konečnou impulzní odezvou (FIR) a systémy s nekonečnou impulzní odezvou (IIR). LTI systém lze tedy jednoznačně definovat diferenční rovnicí nebo jeho impulzní odezvou.

V rámci této problematiky často zaznívají pojmy jako linearita, stabilita či kauzalita. [5] Pakliže je známa impulzní odezva systému $h[n]$ a vstupní diskrétní signál $x[n]$, je možno pomocí *konvoluce* vypočítat signál výstupní. [5]

Dalším důležitým pojmem v oblasti LTI systémů je frekvenční charakteristika. Frekvenční charakteristika, stejně jako impulsní odezva a diferenční rovnice, jednoznačně popisuje LTI systém. Popisuje závislost vlastních hodnot na frekvenci ω a značíme ji $H(e^{j\omega})$. Její výpočet je možné provést aplikováním DTFT na impulsní odezvu $h[n]$ dle

$$H(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h[n]e^{-jn\omega},$$

Frekvenční charakteristika udává, jak komplexní exponenciála změní svou amplitudu a jak se zpozdí průchodem systémem při frekvenci ω_0 . [5]

Jedním z nástrojů používaných při prozkoumávání diskrétních řad a návrhu LTI systémů je DTFT (Discrete time Fourier transform), neboli Fourierova transformace v diskrétním čase. Je to metoda zobrazení z množiny posloupností do množiny spojitých komplexních funkcí reálné proměnné. Neboli pomocí DTFT získáme frekvenční charakteristiku a spektrum daného systému. DTFT je definována jako [5]

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-jn\omega}, \omega \in \mathbb{R}, -\infty < n < \infty.$$

Při práci s nekonečnými řadami se pak používá metoda nazývaná Z-transformace, která je jakýmsi zobecněním DTFT. Zatímco DTFT lze použít pouze na řady, které jsou absolutně sčitatelné, Z-transformace tuto podmínku nemá. Z-transformace je definována jako

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]z^{-n}, z = re^{j\omega}, z \in \mathbb{C}, r \in \mathbb{R}, r > 0.$$

Potom Z-obraz je komplexní funkcí komplexní proměnné a je popsán v Z-rovině. Regionem konvergence se nazývají hodnoty, pro které je součet dané řady konečný. [5] Výsledkem Z-transformace je magnituda a fázová složka.

Velice důležitou vlastností Z-transformace je *konvoluční teorém*, ten říká, že konvoluce dvou signálů v časové oblasti, je ve frekvenční oblasti překlopena na součin jejich obrazů.

Číslicový filtr se dá nazvat výpočetním postupem, transformujícím vstupní vzorkovaný signál na výstupní vzorkovaný signál.

Dělení číslicových filtrů

Dle linearity

- *lineární filtry*
- *nelineární filtry*

Dle kauzality

- *kauzální filtry* - jeho výstupní signál v čase n_0 je nezávislý na hodnotách vstupního signálu v časech $n > n_0$ [6]

- *nekauzální filtry*

Dle impulzní odezvy

- *FIR* - s konečnou impulzní odezvou
- *IIR* - s nekonečnou impulzní odezvou

Dle struktury

- *rekurzivní filtry (RDF)*
- *nerekurzivní filtry (NRDF)*

2.2.1 FIR filtry

Jedná se o lineární číslicové filtry s konečnou impulzní odezvou. Výstup filtru je závislý pouze na vstupu. Je definován jako

$$y[n] = \sum_{k=0}^q a[k]x[n-k],$$

$a[k]$ je konstanta definující systém.

Výhodou FIR filtrů je hlavně jejich stabilita a snadná realizace, a to jak hardwarová, tak i softwarová. Nevýhodou je pak nutnost vysokého řádu filtru (s rostoucím řádem roste zpoždění výstupu vůči vstupu) pro dosažení strmých charakteristik přechodové fáze. [6]

2.2.2 IIR filtry

IIR, filtry s nekonečnou impulzní odezvou, jsou jakousi digitální verzí analogových filtrů. Jedná se o filtry patřící do skupiny rekurzivních filtrů, tedy mají minimálně jednu zpětnovazební smyčku. Může mít tvar

$$y[n] = \sum_{k=0}^q a[k]x[n-k] - \sum_{k=1}^p b[k]y[n-k],$$

$a[k]$ a $b[k]$ jsou konstanty definující systém

Pro vytvoření amplitudové frekvenční charakteristiky se využívá několik aproximací:

- Butterwortova aproximace
- Čebyševova aproximace 1
- Čebyševova aproximace 2
- Eliptická aproximace

Butterwortova aproximace

Požadovaná frekvenční odezva se v obou pásmech (propustné, nepropustné) aproximuje pomocí Taylorovy řady. Má však velmi široké přechodové pásmo, to jde sice zúžit, ovšem tato úprava vyžaduje vyšší řád filtru a tím pádem i vyšší zpoždění a složitější realizaci.

Čebyševova aproximace 1

Tato metoda používá dvě různé aproximace, v propustné části aproximuje pomocí Čebyševova polynomu (zvlněný průběh) a v nepropustné části potom pomocí Taylorova polynomu. [7]

Čebyševova aproximace 2

Tato aproximace je inverzní k Čebyševově aproximaci 1, tedy v propustné části aproximuje Taylorovým polynomem a v nepropustné pak Čebyševovým polynomem.

Eliptická aproximace

Poslední metoda používá k aproximování v obou pásmech Čebyševův polynom. Touto metodou lze navrhnout filtr s nejnižším řádem, ruční návrh je ale v tomto případě nejsložitější ze všech. [6]

2.2.3 Využití filtrace

S ohledem na předpokládaný charakter dat (nizkofrekvenční informace o tvaru optické plochy) a šumu (vysokofrekvenční informace o tvaru povrchu) v nich (data obsahující vysokofrekvenční šum, způsobený členitostí povrchu měřeného elementu), bude z oblasti číslicového filtrování volen některý z frekvenčně selektivních filtrů. Od toho filtru se očekává potlačení vysokofrekvenční složky dat, tedy bude zvolen filtr typu dolní propust.

Přenos takového filtru se dá definovat jako

$$A(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega \leq \omega_0 \\ 0, & \omega > \omega_0 \end{cases},$$

přičemž ω_0 je tzv. *mezí frekvence*. To je frekvence, na které dosáhne pokles přenosu 3dB.

2.3 Statistické metody zpracování dat

2.3.1 SSE

Zbytkový součet čtverců značený jako SSE (sum of squared errors of prediction) nebo také součet čtverců residuí (RSS či SSR z anglického residuals sum of squared resp. sum of squared residuals) nám značí míru nesouladu modelu a dat, která jsou pomocí něho vysvětlována. Používá se jako míra optimálně vybraných parametrů modelu.

Počítá se podle vzorce $SSE = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2$, kde Δ_i - odchylka v bodě i

2.3.2 RMSE

Prvním údajem, kterým je možno popsat přesnost tvaru plochy, je střední kvadratická odchylka, značí se RMSE (root mean square error). Pro její výpočet potřebujeme znát hodnotu SSE pro danou plochu a počet bodů. Na střední kvadratickou odchylku má vliv například zvolený stupeň polynomu. Vhodně zvolený řád polynomu

je takový, u něhož je dosaženo nejmenší střední kvadratické odchylky. Střední kvadratická odchylka se počítá jako druhá odmocnina z podílu součtu čtverců residuí (SSE) a počtu bodů, na kterých jsou residua vypočtena.

$$\text{Tedy } RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{n}}, \text{ kde } n - \text{počet bodů}$$

3 Optické plochy

3.1 Sfěrické plochy

Pojmem sfěrické se označují plochy kulovité charakteru, neboli ty, které mají konstantní ohniskovou vzdálenost, popřípadě by se také daly definovat jako plochy s konstantním poloměrem křivosti. Jedná se o historicky nejstarší prokazatelnou skupinu optických prvků, která byla také nejrozsáhlejší skupinou optických pomůcek. Z historických pramenů plyne, že například v brýlové optice byly až do 19. století používány převážně konvexní (vypouklé) sfěrické čočky. Ty sloužily ke korekcím hypermetropie neboli dalekozrakost a presbyopie neboli snížené schopnosti zaostřit na blízko. [8]

3.2 Asfěrické plochy

Díky novým technologickým postupům a procesům se v dnešní době využívají ve vysoké míře i optické plochy asfěrické. Oproti sfěrickým plochám, které mají konstantní poloměr křivosti, mají asfěrické plochy tento poloměr proměnlivý. Toto proměnlivé zakřivení má stigmatický projev. Elementy tohoto tvaru se využívají hlavně pro účely kompenzace aberace optické soustavy. [9] Asfěrické plochy se vyrábějí pomocí číslicově řízených strojů. Plocha je definována funkcí asfěrické plochy, ta se skládá ze zlomku definujícího základní sfěrickou plochu a polynomu, který ji dále modifikuje.

Má tvar

$$z(x) = \frac{\frac{x^2}{R}}{1 + \sqrt{1 - (1 + k) \cdot \frac{1}{R^2} \cdot x^2}} + a_1 \cdot x^2 + a_2 \cdot x^4 + \dots + a_n \cdot x^{2n},$$

kde:

- parametr x je radiální vzdáleností od osy symetrie
- parametr R je poloměr optické plochy

- parametr k je tzv. kónická konstanta, její hodnota modifikuje charakter základní plochy. Dle hodnoty nabývá plocha tvaru:
 - $k < -1$ hyperboloid
 - $k = -1$ paraboloid
 - $-1 < k < 0$ elipsoid
 - $k = 0$ sféra
 - $k > 0$ elipsoid
- parametry $a_1 \dots a_{2n}$, členy polynomu modifikují plochu. Pro sférickou plochu jsou tyto členy nulové. Tedy i z rovnice asférické plochy lze počítat souřadnice pro plochu sférickou. [10]

3.3 Způsoby obrábění na CNC

Při broušení optických ploch na číslicových strojích se využívá dvou základních typů procesů, při kterých jsou používány dva druhy nástrojů.

- Obrábění jedním bodem
 1. kotoučové nástroje
 2. hrnkové nástroje
- Vícebodové obrábění
 1. hrnkové nástroje

3.3.1 Hrnkové nástroje

Často používané při vícebodovém obrábění, při procesu se využívá kruhové hrany nástroje (obr. 2) a jeho náklonu. Tak je možné jedním nástrojem vyrábět různé poloměry ploch. Pravidlem je, že průměr nástroje musí být větší než poloměr obrobku a to z technologického důvodu, jako je například chlazení nástroje.

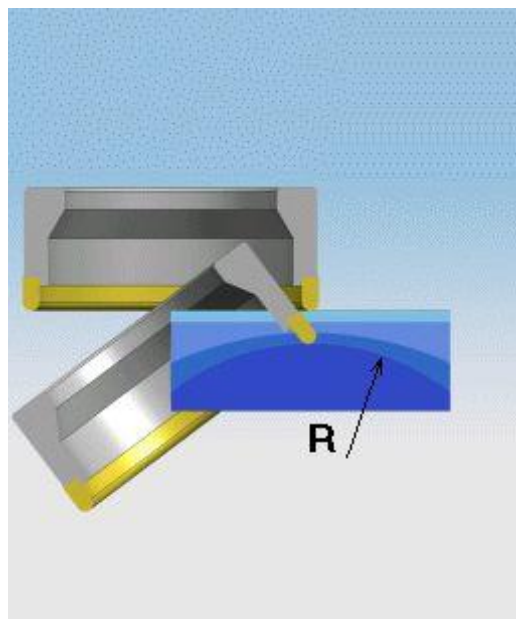
Broušení tímto způsobem je díky úběru větší částí hrany nástroje rychlejší, nežli je tomu u jednobodového obrábění. Jako u ostatních metod je zde nutno použít několik hrubostí nástroje, než je broušená plocha připravena k leštění. Při procesu obrábění se obrobek a nástroj otáčejí vzájemně proti sobě. Proces je znázorněn na obr. 3, nástroj začíná ve vodorovné poloze, postupně se naklání, až dosáhne úhlu potřebného

k vytvoření požadovaného rádiusu. I v tomto procesu dochází k odchylkám, ty jsou povětšinou způsobeny nepatrným posunutím nástroje (způsobeno chybným nastavením offsetů stroje) nebo jeho opotřebením.

Při korigování chyby poloměru plochy dojde k nepatrné změně úhlu natočení nástroje, či jeho posunu v některé ze dvou hladinových os (u většiny strojů osy X, Y). Tato metoda je také, jako ta předchozí, použitelná pouze na plochy s konstantním poloměrem. [10]



obr. 2 Hrnkový nástroj



obr. 3 Znárodnění procesu broušení
hrnkovým nástroje ve stroji OptoTech MCG 100

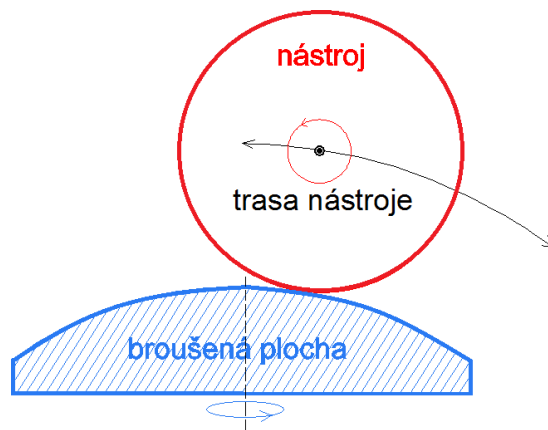
3.3.2 Kotoučové nástroje

Broušení optických ploch kotoučovým nástrojem, je v dnešní době nejuniverzálnější způsob, jak vybrousit optickou plochu. Touto metodou lze vyrábět plochy rovinného, konvexního i konkávního tvaru, a to jak sférické, tak i asférické. Jako u obrábění hrnkovým nástrojem, se i zde broušená plocha točí, aby bylo dosaženo rotační symetričnosti. Nástroj pak obráběcím bodem kopíruje trasu vypočítanou z funkce definující plochu. Jednou z těchto funkcí může být například funkce asférické plochy. Tu lze použít nejen pro výpočet trasy nástroje obou druhů asférické plochy (konkávní, konvexní), ale také pro oba druhy sférické plochy.

Vzhledem ke skutečnosti, že kotoučový nástroj obrábí plochu pouze jedním bodem, je tato metoda časově značně náročnější, než je tomu u nástrojů hrnkových. Dále je pak tato metoda také více náchylná na vznik odchylek, a to hlavně z důvodu opotřebovávání nástroje během procesu. [10]



obr. 4 Kotoučový nástroj firmy DOPA



obr. 5 Schéma pohybu kotoučového nástroje při procesu

3.3.3 Hrubost brusného zrna

Hrubostí brusného zrna na nástrojích se zabývá hned několik norem. Tato vlastnost brusného nástroje ovlivňuje zejména drsnost povrchu broušené plochy. V dnešní době asi nejpoužívanější normou je ISO 6106. Její hodnoty jsou označovány pomocí písmene D nebo B (pro diamantové zrna nebo zrna kubického nitridu bóru) a čísla, například D64. V normě je definováno pro každou hrubost nástroje, jak velké brusné zrna obsahuje, resp. norma přesně definuje, že 99,9% zrněk musí projít sítím o rozměru, který je definován pro danou hrubost. Na obr. 6 je srovnání dvou dalších norem s normou ISO 6106.

| označení hrubosti dle ISO 6106 | hrubost zrna dle ISO 6160 [μm] |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| D46 | 75 |
| D54 | 85 |
| D64 | 97 |
| D76 | 116 |
| D91 | 139 |
| D107 | 165 |
| D126 | 197 |
| D151 | 227 |
| D181 | 271 |

tab. 1 Velikost zrna jednotlivých hrubostí dle ISO 6106

| ISO 6106 (FEPA) | | US Standard ASTM-E-11-70 | ČSN - 224015 |
|-------------------|-----------|-----------------------------|--------------|
| Diamant / Diamond | KBN / CBN | | |
| D 711 | B 711 | 25/30 | |
| D 601 | B 601 | 30/35 | 630/500 |
| D 501 | B 501 | 35/40 | 500/400 |
| D 426 | B 426 | 40/45 | 400/315 |
| D 356 | B 356 | 45/50 | |
| D 301 | B 301 | 50/60 | 315/250 |
| D 251 | B 251 | 60/70 | 250/200 |
| D 213 | B 213 | 70/80 | 200/160 |
| D 181 | B 181 | 80/100 | |
| D 151 | B 151 | 100/120 | 160/125 |
| D 126 | B 126 | 120/140 | 125/100 |
| D 107 | B 107 | 140/170 | 100/80 |
| D 91 | B 91 | 170/200 | |
| D 76 | B 76 | 200/230 | 80/63 |
| D 64 | B 64 | 230/270 | 63/50 |
| D 54 | B 54 | 270/325 | 50/40 |
| D 46 | B 46 | 325/400 | 40/28 |
| D 39 | B 39 | 400/500 | 36/25 |

obr. 6 Porovnání jednotlivých používaných norem

3.3.4 Vazby na brusných nástrojích

Vazbou je na brusném nástroji označováno pojivo, do kterého je zasazeno diamantové zrno nebo zrno kubického nitridu bóru (CBN) a které jej připevňuje k tělu nástroje. U vazby jsou velmi důležité fyzikálně-mechanické vlastnosti. Jednou z nich je například tepelná vodivost, kdy nadměrné zahřívání diamantového zrna zkracuje dobu, za kterou dojde k jeho otupění. Dále je nutné, aby se jednou za čas otupěné brusné

zrnko uvolnilo a dalo tak prostor dalšímu. Tomuto jevu se říká samoostřicí efekt. V praxi používané vazby se pak dělí do čtyř základních skupin:

- kovové vazby
- umělé pryskyřičné vazby
- galvanické vazby
- keramické vazby

Vlastnosti jednotlivých vazeb je předurčují k různým metodám a fázím výroby. [11]
Dále u umělých pryskyřičných vazeb je nutno poznamenat, že k dosažení přijatelného výsledku je zapotřebí nalézt správné nastavení parametrů obráběcího procesu. [12]

3.3.5 Opotřebení nástroje

Stěžejním problémem při obrábění optických ploch je opotřebení nástroje. Pokud se budeme bavit o nástrojích pro CNC (kotoučové, hrnkové), je nástroj vždy složen z upínacího systému, nosného těla nástroje a z brusné vazby. V případě hrnkových nástrojů je pak upínací systém součástí nosného těla nástroje.

Při broušení skla dochází k opotřebení brusné vazby, ta mění svůj tvar a tím se mění i průměr nástroje (kotoučový) resp. délka nástroje (hrnkový). Tato změna se pak nutně projeví na samotném výsledku obrábění odchylkou tvaru plochy. [13]

Proto se u kotoučových nástrojů provádí proces tzv. dressování, [13], tj. obnovení tvaru vazby a obnažení zrněk diamantu pro lepší úběr. Po tomto procesu je vždy nutné nástroj přeměřit a naměřené hodnoty zanést do stroje.

4 Měření

4.1 Bezkontaktní měření

K měření optických ploch se v dnešní době uplatňují dva základní způsoby, kontaktní a bezkontaktní.

Základní myšlenkou bezdotykového měření je potlačit v procesu vliv vzájemného působení měřicího přístroje a měřeného předmětu, kterým trpí většina dotykových metod.

Některé z bezdotykových metod jsou například, metody geometrické optiky nebo interferometrické metody.

4.1.1 Metoda geometrické optiky

Tato metoda je také někdy nazývána jako deflektometrie a jako jedna z mála metod se využívá i k měření obecných ploch. [14] Na měřený profil je promítán bod nebo čára (pomocí laseru), ta je pak kamerou snímána. Při změně profilu lze pak pozorovat pohyb promítaného bodu (čáry). Při použití čáry pak navíc i její deformace. [15]

4.1.2 Interferometrická metoda

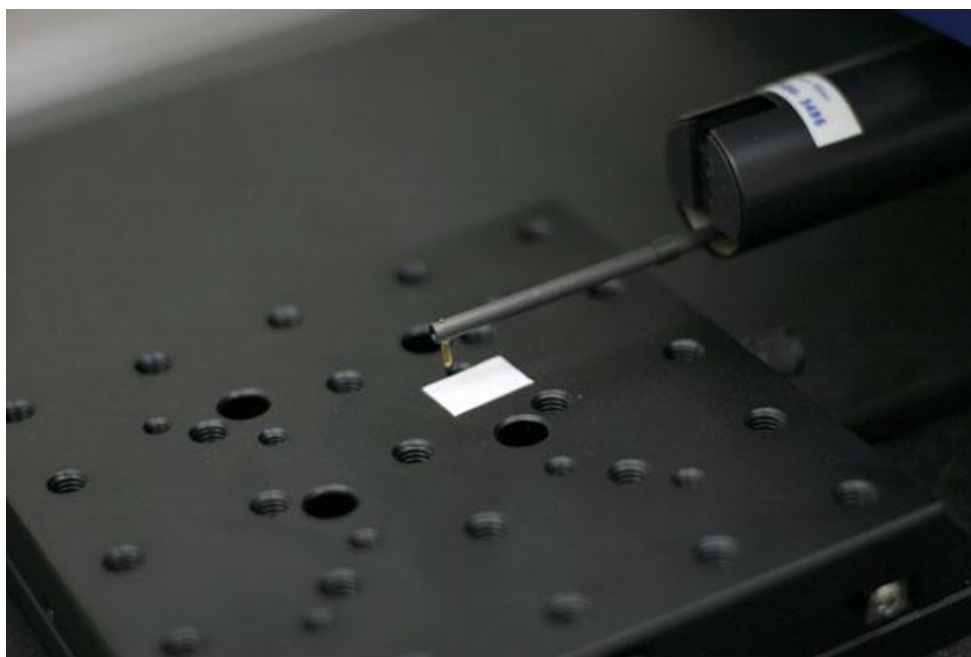
Metoda je založená na promítání vlnoplochy na měřený profil a sledování její deformace. Promítaná vlnoplocha má tvar požadovaného profilu. Při promítnutí na optickou plochu s odchylkou tvaru dojde k deformaci odražené vlnoplochy. Při interferování těchto dvou vlnoploch (promítané a odražené) získáme interferenční pole, z něhož je možno vyhodnotit odchylky od požadovaného tvaru. [16]

4.2 Kontaktní měření

Ke kontaktnímu měření se používají dotykové souřadnicové měřicí stroje nebo kontaktní profilometry. Oba tyto typy přístrojů disponují měřicí hlavou upevněnou k robotu, jenž ji polohuje.

U souřadnicového měřicího stroje se tento robot při měření pohybuje (žádná z os není zpevněná) a snímá hodnoty ve všech osách. Tyto přístroje slouží k měření prakticky jakéhokoli předmětu. Limitujícími parametry jsou například délka měřicí sondy nebo maximální úhel otočení sondy.

U kontaktního profilometru pak záleží na jeho typu. U 2D profilometru probíhá měření pouze v jedné z os X, Y , u 3D profilometru pak i v druhé ose. Pohyb v třetí ose, měřené ose Z , je vykonáván pouhým nakláněním ramene s měřicím dotekem (stylusu). [17]



tab. 2 Příklad měřicí halvy dotykového profilometru Form Talysurf i120 [18]

4.2.1 Souřadnicové měřicí stroje

Jedná se o číslicové roboty (kloubové nebo tříosé). Kloubové se nejčastěji používají na linkách, složí k měření přímo ve výrobě. Mají nižší přesnost, ale disponují vysokou variabilitou. Oproti tomu tříosé souřadnicové měřicí stroje jsou povětšinou určeny tam, kde výrobek může po dobu měření opustit výrobní proces. Zároveň mají tužší konstrukci, díky tomu vyšší přesnost, a jsou náročnější na prostor. [19]

Každý měřicí stroj je osazen měřicí hlavou, ta je dále osazena stylusem s měřicím dotekem (nejčastěji tvaru koule). Při měření nerovinných ploch tímto dotekem dochází v závislosti na gradientu plochy k posunu vztyčného bodu i na doteku měřicího stroje. Toto je jeden z mnoha problémů, které při měření musí obslužný software výpočetně kompenzovat. [17]

5 Použité technologie, aplikace a postupy

5.1 Mitutoyo Legex 774

Centrum TOPTEC disponuje souřadnicovým měřicím strojem Mitutoyo Legex 774. Je to universální měřicí stroj určený k měření jakýchkoli trojrozměrných součástí.



obr. 7 Stroj Mitutoyo Legex 774 [20]

Stroj je osazen víceosou měřicí hlavou Renishaw PH10MQ, ta je osazena kulovým dotekem. Mitutoyo Legex 774 je souřadnicový měřicí stroj portálového typu. Portál je pevně spojen s konstrukcí stroje a mechanismus na něm upevněný obstarává pohyb ve dvou osách (osy X a Z), o třetí pohyb se stará pojízdný stolek stroje (osa Y) určený k upevnění měřeného dílu. Výrobce udává přesnost stroje je $0,5\mu\text{m}$, samotná měřicí hlava má dle výrobce opakovatelnou polohovatelnost $0,4\mu\text{m}$. [20][21]

5.2 Metoda upevnění měřené plochy

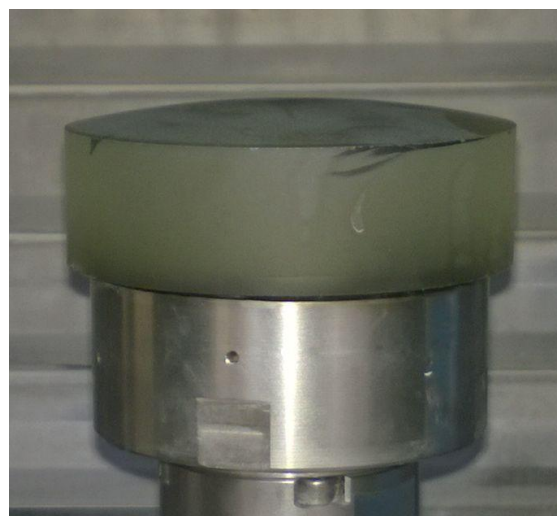
Nedílnou součástí přesného měření je dobré upevnění měřeného objektu. Ke stolku souřadnicového měřicího stroje je proto připevněna laboratorní deska, na kterou je možné sestavit jakoukoli konstrukci.

První metoda upevnění, která byla testována, bylo upevnění do kleštiny. Po sléze se ale ukázalo, že upínací prostor není dostatečně velký na to, aby došlo k naprosto přesnému ukotvení upínaného předmětu. Při této metodě docházelo k velkým nepřesnostem při opakovaném měření. Proto bylo od této metody upuštěno.

Druhou metodou, která byla testována, bylo uložení na třech bodech. Pomocí tří bodů v prostoru lze definovat rovinu, což je právě to, co pro opakovatelné uložení měřeného předmětu bylo potřeba. Obrobek, který je upevněný na tzv. tmelce, je vkládán na tři ocelové tyčky (obr. 8) s kulovitou špičkou a dále je opřen o dvě válcovité zarážky, aby byla vymezena stále stejná pozice při opětovném vkládání.



obr. 8 Tříbodový systém držení obrobku při měření



obr. 9 Obrobek upevněný k tmelce, vkládáný do měřicího stroje

5.3 Metoda měření

Souřadnicový měřicí stroj Mitutoyo Legex 774 je určen pro obecná měření. Bylo tedy nutno nalézt způsob, jak broušené plochy měřit.

Základní metoda měření je snímání v bodě. Stroj se ve dvou ze tří os nastaví na pozici, kde má být provedeno měření, následně se ve třetí ose přibližuje k měřenému objektu, až se ho dotkne a zjistí tak souřadnici. Tato metoda je velice přesná a ve většině případů ta nejlepší, jakou lze využít.

V našem případě, kdy měřená plocha má průměr např. 300mm a snímání je požadováno v intervalu 0,1mm (3000 bodů), by tato metoda byla časově příliš náročná. Při předpokladu, že by změření jednoho bodu trvalo 2s, by tato úloha trvala přibližně 100min. Tato doba je však nepřiměřeně vysoká tomu, že se měří pouze hrubě obrobená plocha.

Z tohoto důvodu bylo nutno nelézt jinou metodu měření. Software dodaný k měřicímu stroji obsahuje režim tzv. měření kontury. V tomto režimu je měřicí sonda tažena po povrchu plochy a v daném intervalu snímá svou pozici. V našem případě probíhá měření vždy ve směru jedné z os X nebo Y, přičemž ta druhá by v ideálním případě měla být nulová. Vzhledem k členitosti povrchu a skutečnosti, že měřicí sonda je ze své podstaty ohebná, se dá předpokládat, že v této sekundární ose bude docházet k nepatrným odchylkám. Ty však bude možné vzhledem k přesnosti měření zanedbat.

5.4 Kompenzace náklonu

Sklo je při opracování lepeno na tzv. tmelku (obr. 10, obr. 11). Je to povětšinou ocelový nebo hliníkový přípravek ve tvaru hrnku, pomocí kterého se sklo upevňuje do strojů. Při výrobě těchto tmelek se hledí pouze na přesnost rozměrů v části, kde sklo dosedá na tmelku, a dále na přesnost rozměrů části, která je vkládána do upínacího systému stroje. Všechny ostatní rozměry nejsou zcela důležité pro proces výroby. Proto se nedá předpokládat jejich vysoká přesnost.



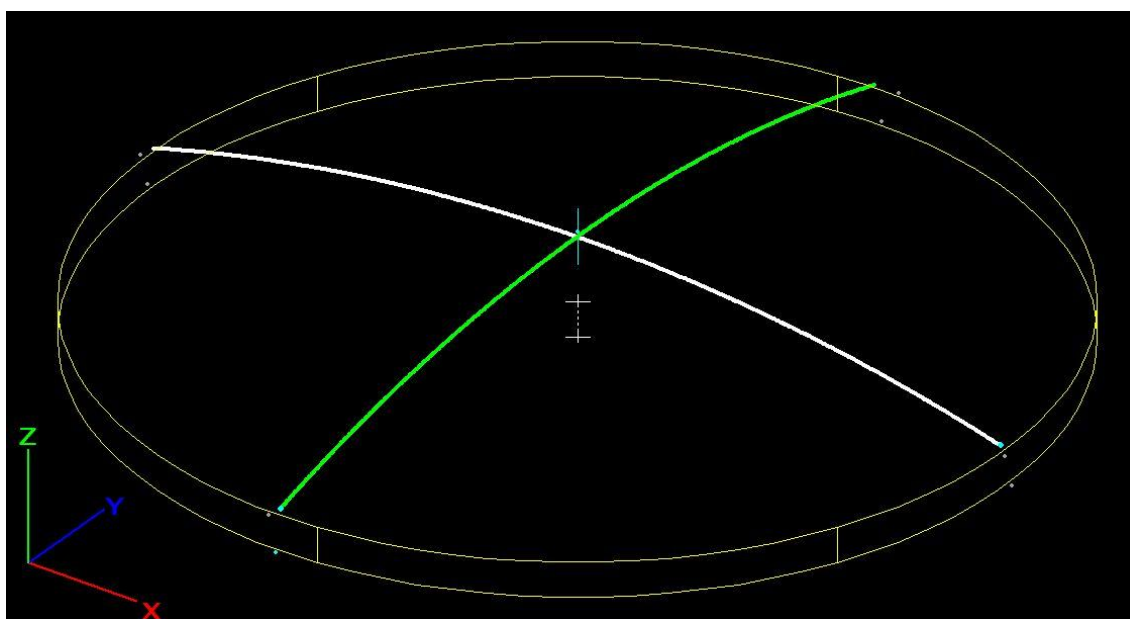
obr. 10 Tmelka - část určená k lepení k obrobku



obr. 11 Tmelka - část určená k upínání do
obráběcího stroje

Při vkládání do měřicího stroje je tmelka položena na tříbodový systém právě jednou z ploch, kde je zcela neznámá její přesnost či náklon. Proto je zapotřebí nejprve vytvořit kompenzace náklonu. Zde se využívá skutečnosti, že každý optický element je před samotným generováním optické plochy tzv. kulacen. To znamená, že se boční strany zabrousí do válce.

Tento válec se měřicím strojem Legex 744 pomocí osmi bodů změří. Následně si stroj vytvoří model válce a pomocí toho pak vypočítá kompenzaci náklonu plochy (obr. 12).



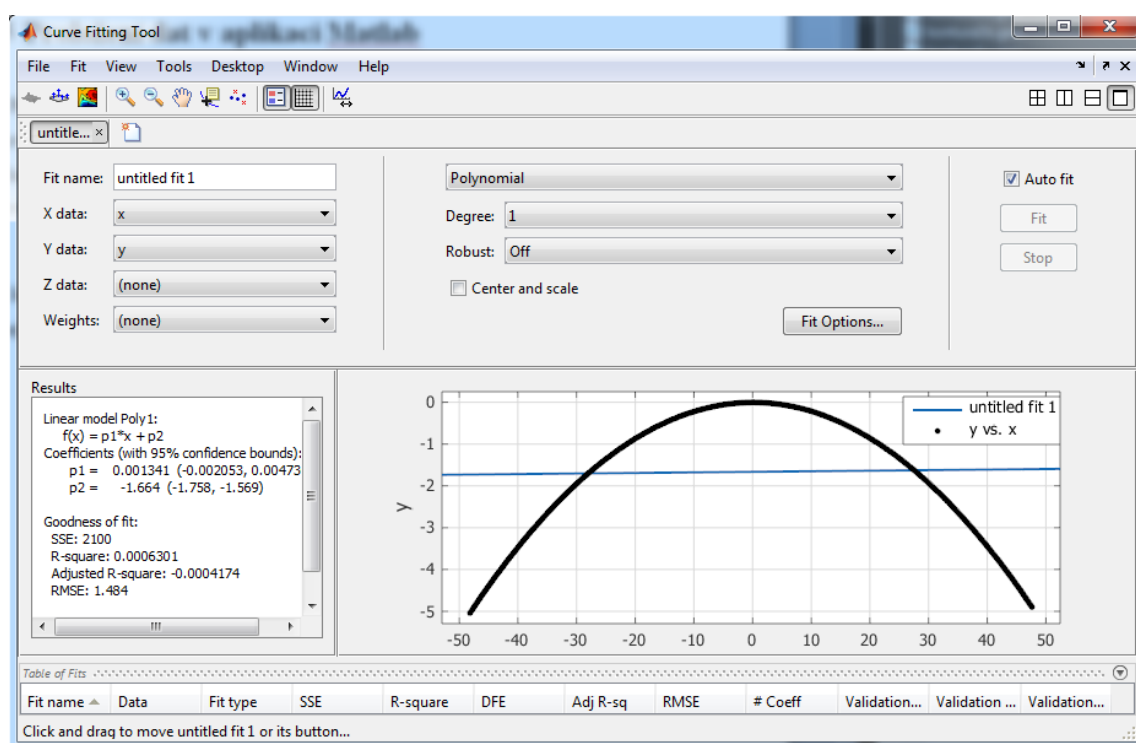
obr. 12 Znáznornění měřené válcovité boční strany obslužným softwarem stroje Mitutoyo Legex 774

5.5 Proložení dat v aplikaci Matlab

Pro odstranění vysokofrekvenční složky z dat bylo po zvážení vybráno prokládání dat funkcí. Tato metoda je jednodušší nežli filtrace a pro naši aplikaci zcela dostačující.

Pro veškerou manipulaci s daty byl zvolen *Matlab*. Konkrétně jeden z jeho modulů s názvem *Curve Fitting Tool*. Modul nabízí mnoho typů funkcí, které je možné pro prokládání dat využít. V našem případě byly použity funkce polynomu n -řádu a funkce definované uživatelem.

Základem jsou správně formátovaná data, ta musejí být načtena do dvou (2D data) nebo tří (3D data) datových polí. Tato pole představují X, Y a Z souřadnice jednotlivých bodů, přičemž jejich délka (musí být jednotná) udává počet bodů. Pokud se stane, že délky těchto polí nesouhlasí modul zahlásí chybu.



obr. 13 Okno modulu CFTool aplikace Matlab

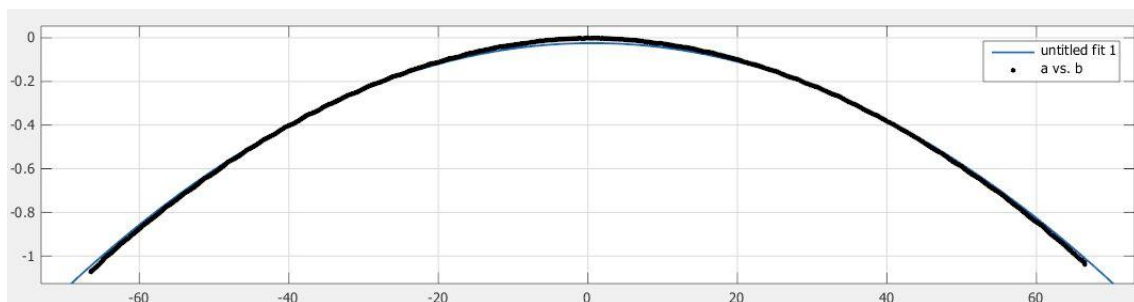
Celý modul (obr. 13) je rozdělen do čtyř částí. V první části se volí data, která mají být načtena. Zde je důležité správně zvolit jednotlivá pole, v nichž máme uložená data.

Další část se zabývá funkcí, kterou mají být data proložena. Zde je na výběr několik typů funkcí, jako je například polynom n -řádu (na výběr je první až devátý řád), dále exponenciální funkce, lineární či kubická interpolace a v neposlední řadě funkce, kterou může uživatel zadat sám (obr. 14).

obr. 14 Formulář pro zadání vlastního předpisu požadované funkce

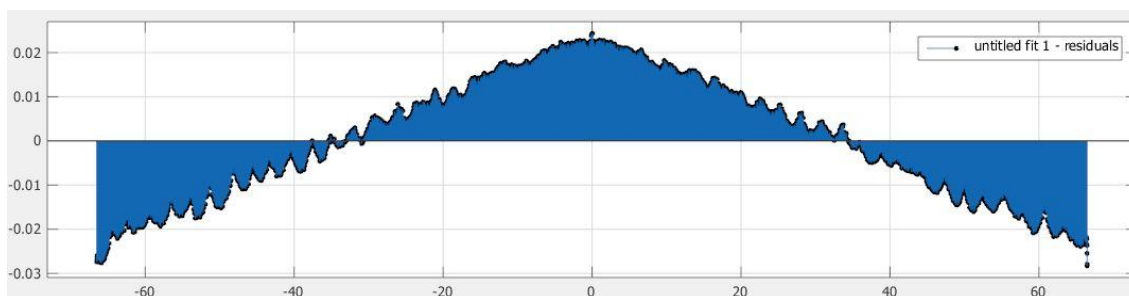
Kromě těchto dvou prvků obsahuje modul část, kde jsou data vyobrazena a kde je znázorněn výsledek proložení zvolenou funkcí. Zde si může uživatel zvolit ze tří možností, jak budou data zobrazena.

První a zároveň základní zobrazení, uživateli ukáže surová data a zvolenou funkci, kterou data byla proložena. Uživatel tak může vizuálně zkontrolovat, zdali jím zvolená funkce odpovídá tomu, co uživatel očekává.



obr. 15 Panel zobrazující odchylku dat (černá křivka) a nominální funkce (modrá křivka v pozadí)

Další možností na výběr je zobrazení residuí nebo li odchylek. Tyto odchylky jsou jedním z důležitých výstupů celého modulu. Uživatel z nich může vyčíst, k jak přesnému proložení došlo, případně určit odchylky od požadovaného tvaru.



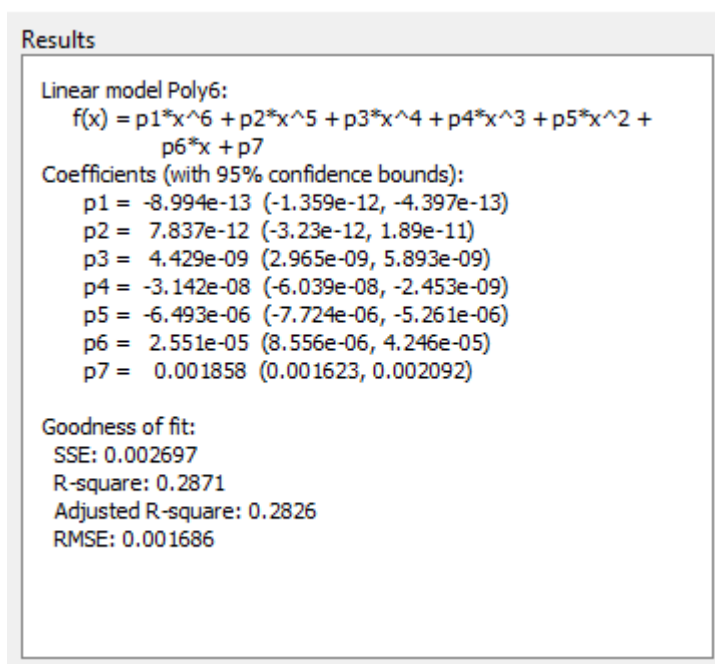
obr. 16 Panel zobrazující rezidua po proložení

Samotný modul z těchto dat vypočítává součet čtverců residuí (SSE), střední kvadratickou odchylku (RMSE) a dále procentuální úspěšnost, s kterou byla data prokládáním vystihnuta.

Třetím volitelným vyobrazením je pak vrstevnicové vyobrazení trojrozměrných dat.

Čtvrtou a poslední částí modulu jsou výsledky proložení. Zde jsou uživateli předloženy nejen informace o SSE a RMS, ale také o parametrech samotné funkce. Jsou zde vypsány veškeré proměnné parametry funkce i s hodnotami, které byly při proložení použity.

Například při prokládání polynome, jsou zde vypsány jednotlivé koeficienty použité při prokládání, včetně rozsahu, ve kterém modul testoval co nejlepší výsledek proložení.



obr. 17 Panel zobrazující data výsledku proložení (parametry proložené funkce)

V případě, že uživatel použije vlastní funkci, jsou zde vypsány koeficienty, které zvolil jako proměnlivé, jak je znázorněno na obr. 14 (při prokládání funkcí zadanou uživatelem, je nutné, aby tato funkce měla minimálně dva proměnlivé koeficienty, aby modul mohl provést doladění).

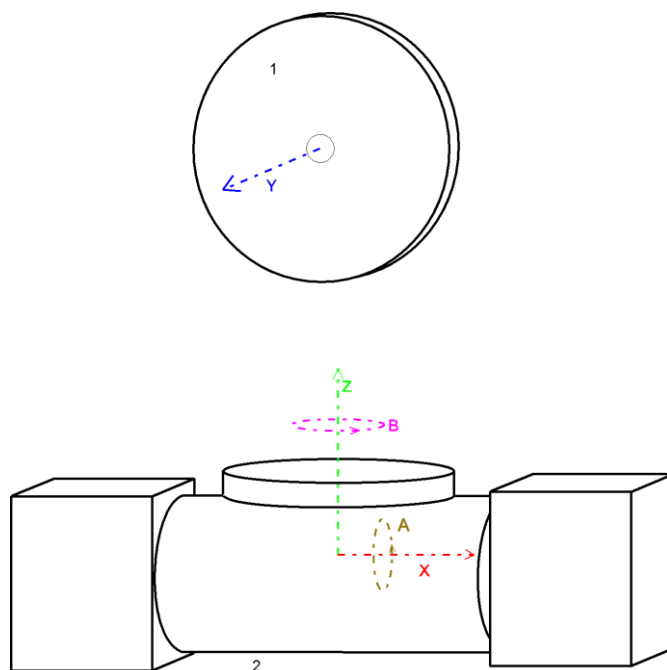
Modul dokáže komunikovat s ostatními součástmi aplikace Matlab, takže nabídne například sdílení residuálních dat, či export grafického vyobrazení do modulu *Figure*. Dále poskytuje možnost validace dat oproti dalším zadaným datům.

5.6 Stroj TOS FNG 50

5.6.1 Představení stroje TOS FNG 50

Obráběcí centrum TOS FNG 50 je nástrojařská fréza se souvislým řezáním. Primárně byla určena pro frézování, vrtání či závitování. V roce 2012 byla však provedena kompletní přestavba a renovace. Z obráběcího centra se stal stroj na hrubé dělení a broušení skla kotoučovými nástroji.

Obráběcí centrum disponuje pěti osami, z nichž tři jsou posuvné (X,Y,Z) a zbylé dvě rotační (A, B viz obr. 18). Osa A s rotací okolo osy X a osa B s rotací okolo středové osy upínacího stolku. Samotný stolec má nosnost 350 kg, což dalece převyšuje potřeby.



obr. 18 Schéma stroje TOS FNG 50, 1) obráběcí nástroj, 2) lože s upínacím stolcem

Osa B je velmi přesně polohovatelná, a to až na tisíce stupňů. Při snaze dlouhodobě s ní otáčet by mohlo dojít ke snížení přesnosti a následnému zničení osy. Proto bylo v rámci předchozí ročníkové práce navrženo řešení, jak s obrobkem otáčet v rozmezí 10 – 300 ot./min.

Navrženým řešením bylo přidání krokového motoru. Ten byl upevněn na pracovní stolek stroje. Výrobky jsou pak upevňovány právě na tento motor. Pro výběr motoru byla limitující jeho výška, protože je ve stroji omezený prostor, a jelikož samotný upínací systém a obrobek zabírají dost místa, bylo nutno vybrat takový motor, aby jeho rozměry neznemožnily jeho využití. Vybrán byl motor od firmy NSK s typovým číslem SSB014GN527. Výška tohoto motoru i s upevňovacím systémem nepřesahuje 200mm, což nechává dostatek míst pro obrobek.

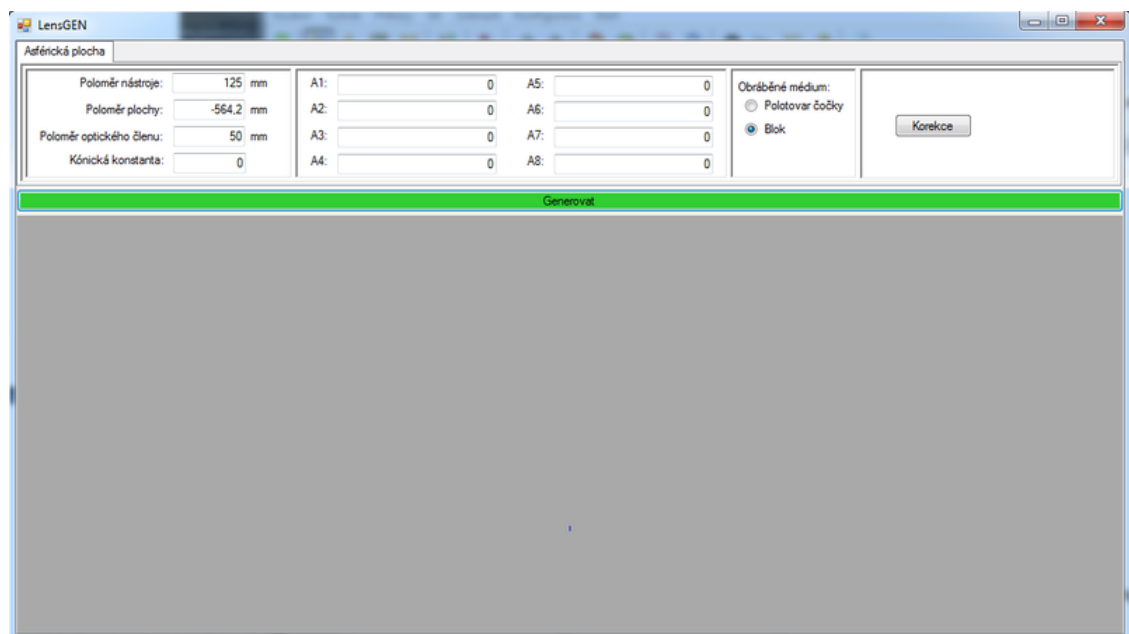
Motor je řízen kontrolérem NSK ESA 21. Tento kontrolér je možné ovládat pomocí sériového rozhraní RS232. Je možné nastavovat parametry, jako je rychlost otáčení (konstantní rychlost po celou dobu rotace), zrychlení, délka či počet kroku a doba setrvání v dané pozici. Pro účely otáčení obrobkem postačí pouze rychlost a počet kroků.



obr. 19 Ukázka úpravy stroje, vyobrazen je pohon NSK (spodní část), dále obrobek a obráběcí nástroj

5.7 Generování kódu G-CODE

O generování řídicích programů pro stroj TOS se stará aplikace, která byla vytvořena v rámci předchozí ročníkové práce.



obr. 20 Aplikace LensGEN vytvořená v předchozí ročníkové práci

Aplikace přijímá základní informace o ploše, která má být vyrobena, a informace o nástroji, který bude použit. Na jejich základě je vytvořen řídicí program pro CNC. Aplikace dovoluje uživateli generování řídicích programů pro sférické i asférické plochy a také pro plochy konvexní i konkávní.

5.7.1 Úprava aplikace

Pro zapracování korekcí bylo nutno provést úpravu. Při načtení souboru s korekčními daty (sloupec reálných čísel odpovídající jednotlivým bodům počítaným při generování řídicího kódu) a opětovném vygenerování řídicího kódu jsou korekční data přičtena k původním vygenerovaným hodnotám. Přičemž jejich pořadí v textovém souboru přesně definuje, ke kterému bodu budou při výpočtu přičteny.

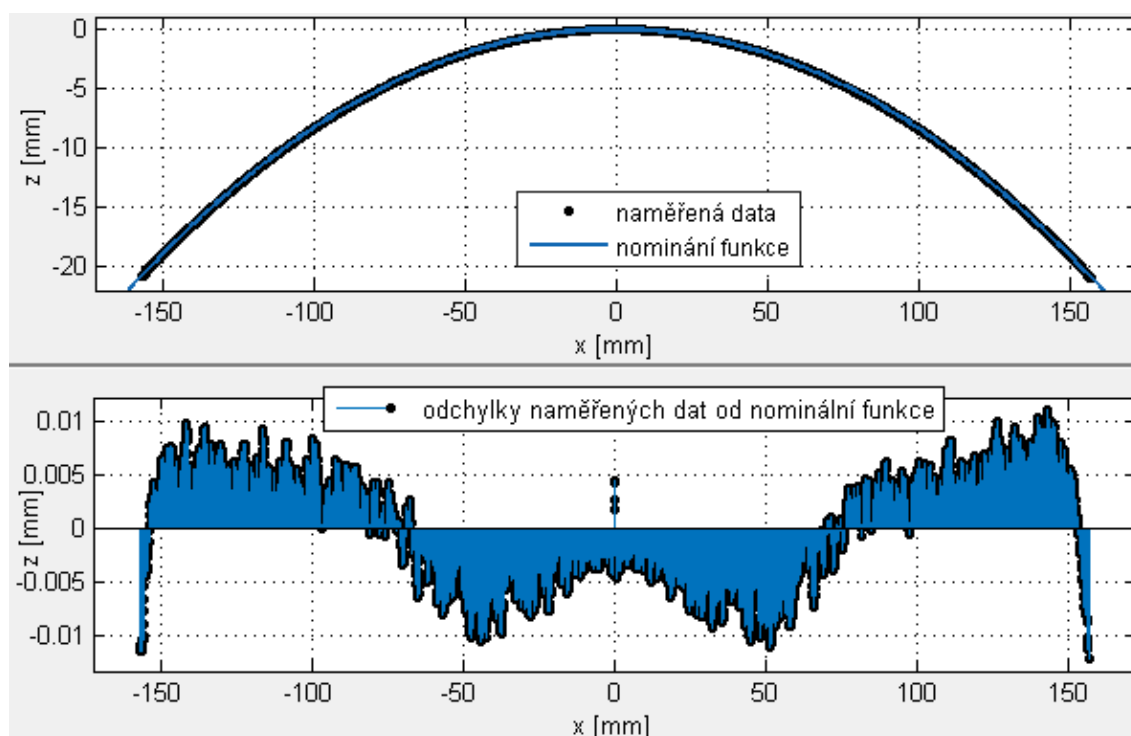
5.8 Zpracování naměřených dat

Výstupní data naměřená souřadnicovým měřicím strojem Mitutoyo Legex 774 jsou řada diskrétních bodů v prostoru. Protože měřicí stroj nesnímá data v naprosto přesných intervalech a protože je třeba naměřená data dále porovnat s požadovanou plochou, je třeba data upravit tak, aby bylo možné je využít pro korekce.

Data naměřená souřadnicovým měřicím strojem Mitutoyo Legex 774 (jejich formát je znázorněn v příloze (příloha A) je nutno nejdříve zpracovat. Hlavička tohoto souboru obsahuje několik důležitých informací, které je nutno při zpracování brát v úvahu. Na třetím řádku souboru je první důležitá informace, to je informace o tom, jak jsou data v souboru uspořádána. Soubor vždy obsahuje šest sloupců a tento řádek nás informuje i o jejich významu. V případě dat v příloze (příloha A) řádek říká, že v prvním sloupci jsou zapsány hodnoty osy Z, v druhém hodnoty osy X a v třetím hodnoty osy Y. Dalším důležitým řádkem v hlavičce souboru je informace o jednotkách, ta je zapsaná na pátém řádku souboru. Data samotná jsou pak zapsána ve zbytku souboru, a to v prvních třech sloupcích.

5.9 Metoda tvorby korekčních dat

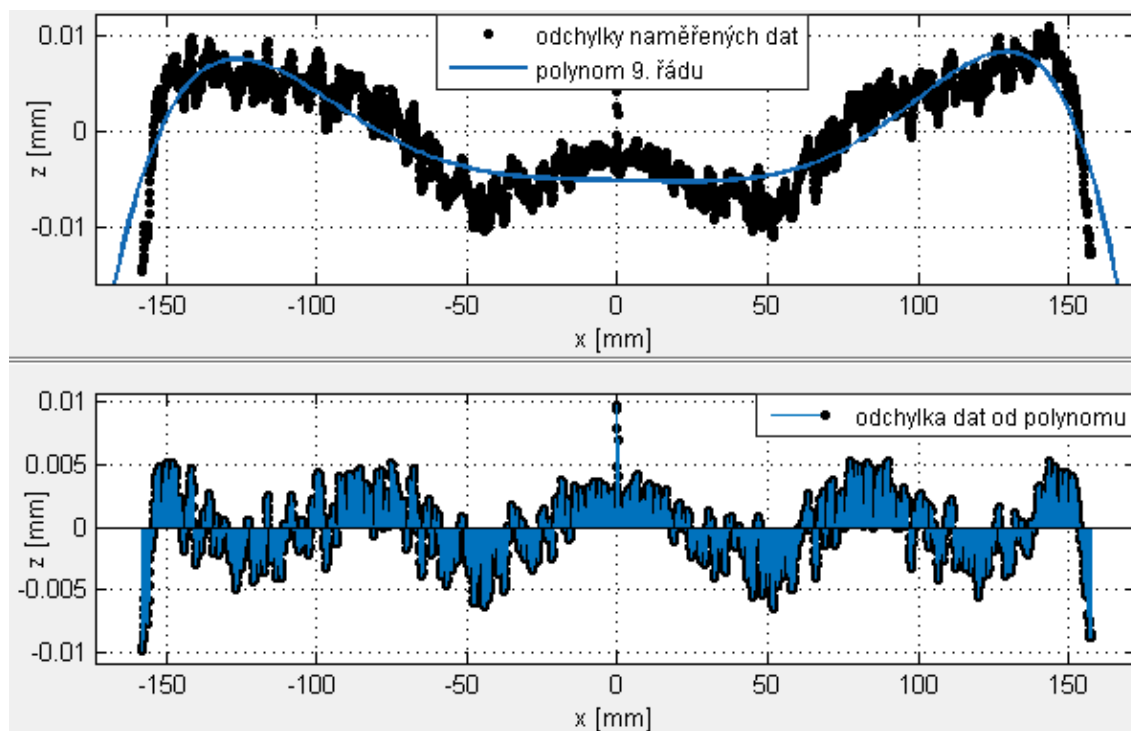
Pro prvotní proložení dat s cílem získat residua je použita nominální funkce plochy. Tak získáme odchylky naměřených hodnot od hodnot požadovaných. Modul Cftool při proložení residuálních dat vypíše veškeré parametry polynomu, kterým data proložil. Tento proces je znázorněn na (obr. 21). V první polovině je znázorněno proložení dat, černá křivka znázorňuje data naměřená souřadnicovým měřicím strojem. Modrá křivka pak znázorňuje nominální funkci, v tomto případě funkcí $f(x) = \sqrt{R^2 - (x + a)^2} + b$, kterou jsou naměřená data proložena. Ve spodní části obrázku jsou pak znázorněny odchylky (residua) v jednotlivých bodech měření. Jak je patrné z vyobrazení, povrch plochy je velice členitý. Při zadávání korekcí není vhodné vytvářet korekční data přímo z naměřené informace, protože její součástí jsou i chyby tvořené nepřesností metody měření a členitostí povrchu.



obr. 21 Proložení naměřených dat nominální funkcí, ve vrchní části zobrazení tvaru plochy a ve spodní části zobrazení residuí

Proto je nutné data dále zpracovat. Prvním testovaným postupem bylo zvoleno proložení residuálních dat polynomem vysokého řádu, tím získáme přibližný tvar

deformace plochy a odstraníme tak vysokofrekvenční zvlnění způsobené hrubostí povrchu (obr. 22). Tento způsob se ale ukázal jak nepřesný. Jak je vidět ze spodní části (obr. 22), i při proložení polynomem vysokého řádu jsou odchylky příliš velké a na korigované broušené ploše se projeví.

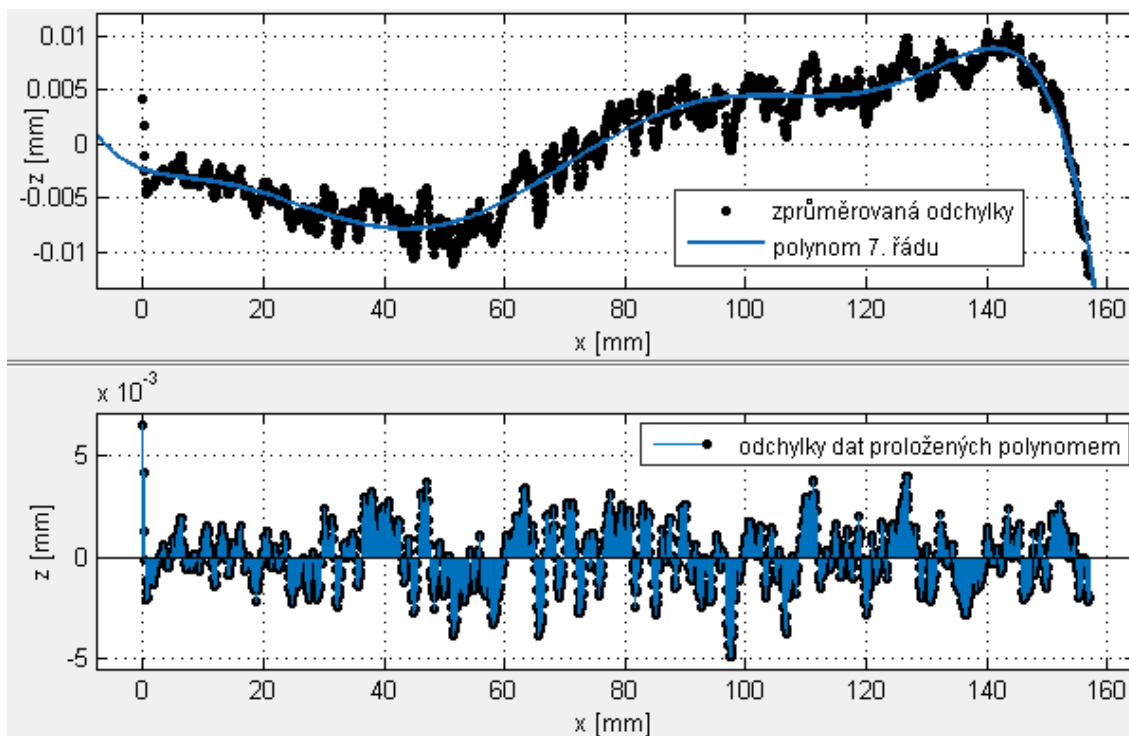


obr. 22 Proložení residuí polynomem n -tého řádu se záměrem získat informaci o tvaru residuí

Proto bylo přistoupeno k testování druhé metody. Protože je optická plocha rotačně symetrická a kotoučový nástroj tak putuje pouze od středu ke kraji, je třeba data oříznout tak, aby byla hodnota $x \geq 0$. Protože by ale pouhým oříznutím došlo ke ztrátě podstatné části informace, tak se přistoupilo k metodě průměrování. Data jsou tedy rozdělena na dvě skupiny, kde $x \geq 0$ a $x \leq 0$, tyto dvě skupiny jsou zprůměrovány do jedné výsledné.

Následně jsou tato zprůměrovaná data proložena polynomem. Jak je vidět z (obr. 23), proložení je mnohem přesnější nežli v předchozím případě. Ve spodní části obrázku, jsou vidět odchylky zprůměrovaných dat a polynomu, kterým byla proložena. Je patrné, že odchylky v tomto grafu jsou pouze odchylky způsobené hrubostí povrchu.

Tento polynom je pak vzorkován v závislosti na potřebě. V našem případě po 0,1mm. Pak jsou data následně zapsána do textového souboru. Tento textový soubor s korekčními daty je načten do aplikace sloužící ke generování řídicího kódu pro CNC a následně je vygenerován řídicí kód s korigovanou dráhou, který je nahrán do stroje.



obr. 23 Proložení poloviny dat (obě poloviny zprůměrovány do jedné) polynomem n -tého řádu

6 Testy broušení a měření

6.1 První testy

Pro první testy byl zvolen materiál bez označení. Vzhledem k povaze pokusu, kde šlo pouze o prvotní test funkčnosti dané metody broušení, tomu nic nebránilo. Parametry zvolené pro testovací plochu byly:

- $R = 233.7$ poloměr broušené plochy
- $D = 100$ průměr optického elementu

Ostatní parametry asférické funkce jsou nulové, tedy cílem bylo vybrousit sférickou (kulovou) plochu. Jako obráběcí nástroj byl zvolen diamantový rádiusový kotouč s parametry $D=250$, $R=10$ a hrubostí zrna 160/125 dle normy ČSN - 224015. Nástroje s touto hrubostí jsou určeny pro účinné broušení a hrubování.

Otáčky obrobku byly nastaveny na 60 ot/min . a otáčky nástroje byly vypočteny tak, aby nástroj dosahoval řezné rychlosti 18 m/s . To je pro kotoučový nástroj o průměru $D = 250 \text{ mm}$ přibližně 1400 ot/min . Výpočet dle vzorce

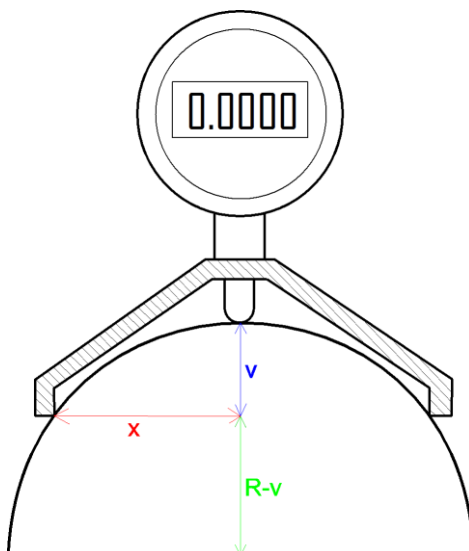
$$n = \frac{60 * s}{\pi * D},$$

kde $s[\text{m/s}]$ je řezná rychlost, $D[\text{m}]$ je průměr nástroje a $n[\text{ot/min}]$ je počet otáček.

Při tomto prvním testu bylo cílem zjistit, zdali navržená úprava stroje a aplikace, která slouží ke generování řídicích kódů pro stroj, splňují podmínky nutné k broušení správného profilu optické plochy.

Ke změření výsledné plochy byla použita metoda měření vrchlíku pomocí kroužku (obr. 24). Tato metoda je v případě jemně broušeného, či leštěného povrchu velice přesná a lze pomocí ní dělat i korekce. V našem případě, kdy měříme hrubě broušený povrch plochy, je toto měření pouze orientační. Výpočet byl pak proveden ze vzorce

$$R - v = \sqrt{R^2 - x^2}, \text{ po úpravě získáme } R = \frac{x^2 + v^2}{2v}.$$



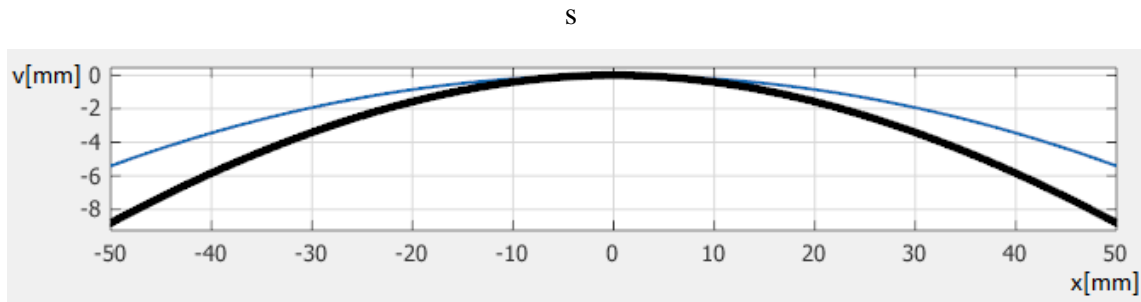
obr. 24 Znáznornění metody měření sférických ploch pomocí kroužku

Pomocí této metody bylo zjištěno, že vyrobená plocha je od té požadované značně odlišná. Proto bylo nutno prověřit, zdali vzorce používané v aplikaci určené ke generování řídicích kódů pro CNC jsou správné.

Po důkladném pátrání bylo zjištěno, že v aplikaci byla zanesená asférická funkce ve špatném tvaru. Ve jmenovateli funkce chyběl prvek, který je červeně vyznačen ve funkci

$$z(x) = \frac{\frac{x^2}{R}}{1 + \sqrt{\textcolor{red}{1} - (1+k) \cdot \frac{1}{R^2} \cdot x^2}} + a_1 \cdot x^2 + a_2 \cdot x^4 + \dots + a_n \cdot x^{2n}.$$

Níže je zobrazeno, jak se tato chyba projevila na broušené ploše. Černě zbarvená křivka znázorňuje průběh chybné asférické funkce, ta modrá pak asférickou funkci s napravenou chybou pro poloměr $R=233,7mm$.



obr. 25 Znáznornění odchylky způsobené chybným zadáním asférické funkce

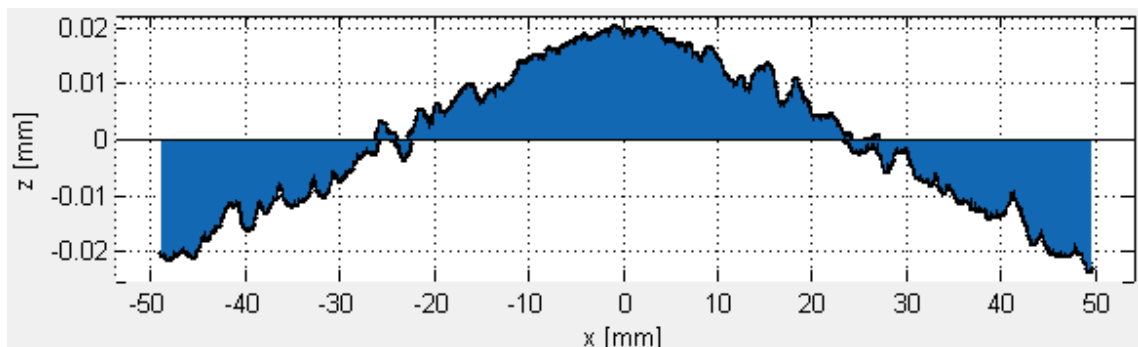
6.2 Testy metody měření

Aby bylo možno data ze souřadnicového měřicího stroje MitutoyoLegex 774 použít, bylo nutno ověřit, s jakou přesností stroj dokáže naše optické plochy opakovaně měřit. Pro tento účel byla vyrobena a zkorigována plocha s parametry

$$R = 233,7mm \text{ a } D = 100mm.$$

Pro výrobu byly použity tyto parametry:

- otáčky nástroje $N_T = 1400 \text{ ot./min}$
- otáčky obrobku $N_S = 60 \text{ ot./min}$
- rychlost úběru $F = 4,9 \text{ mm/min}$
- velikost třísky $S = 0,1 \text{ mm}$



obr. 26 Nabroušená plocha s poloměrem 233,7mm před korekcí odchylek

Polynom 5. stupně, kterým byla data proložena měl parametry

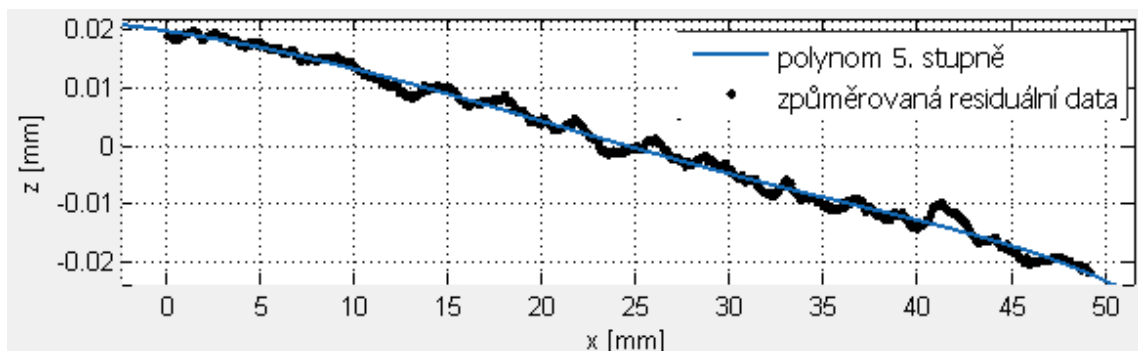
$$f(x) = p1 * x^5 + p2 * x^4 + p3 * x^3 + p4 * x^2 + p5 * x + p6,$$

kde:

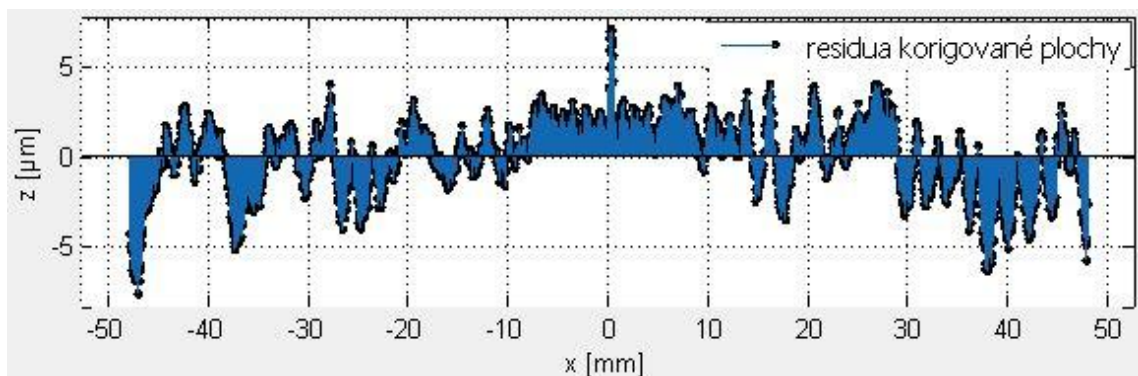
$$p1 = -2.926e-10 \quad p2 = 2.4e-08$$

$$p3 = -3.108e-07 \quad p4 = -1.524e-05$$

$$p5 = -0.00049 \quad p6 = 0.01946$$



obr. 27 Residua proložená polynomem 5. stupně



obr. 28 Výsledná residuální data po korigování chyb

V rámci testu bylo provedeno deset měření. Při každém měření byl výrobek umístěn do měřicího stroje se snahou o co nejpřesnější orientaci, aby bylo opakované měření prováděno na stejném profilu. Bylo provedeno měření v ose X následně v ose Y (osy měřicího stroje) skládající se z ručního zaměření válcovité boční strany a samotného

automatického měření profilu plochy. Následně je obrobek z měřicího stroje vyjmut a celý cyklus opakován.

Jak již bylo zmíněno, data ze souřadnicového měřicího stroje Mitutoyo Legex 774 jsou ve formátu tří reálných čísel odpovídajících hodnotám v trojrozměrném prostoru. Vždy jeden údaj určuje pozici v ose měření (osa X nebo osa Y), další údaj určuje pozici v ose Z, ten je závislý na ose měření. Třetí údaj určuje pozici v třetí ose (osa Y nebo osa X, dle hlavní osy měření), ten by měl být nulový. Při reálném měření je tento údaj nenulový, ale jeho hodnota je tak malá, že je zanedbatelná.

Jedním ze zadávaných parametrů měření je krok v ose měření, po kterém se mají data snímat. Měřicí stroj ale nesnímá data v naprosto přesném bodě odpovídajícím danému kroku. Proto je při opakovaném měření vzorkování měřených dat odlišné od předchozího měření a pro jejich porovnání je nutno data upravit.

Pro veškerou manipulaci s daty byl použit software Matlab. V rámci vyhodnocení byly sledovány hodnoty SSE respektive RMSE a dále největší a nejmenší odchylka v samotných datech. Aby bylo možno tyto údaje vypočítat, bylo nutno data dále upravit.

Protože je souřadnicový měřicí stroj velmi přesné zařízení a jeho sonda kromě reálné tvarové odchylky na optické ploše zavádí do naměřených dat i informaci o členitosti povrchu (jeho hrubost, způsobená hrubostí nástroje), je nutno tuto informaci pro další výpočty odstranit. K tomu byla použita stejná metoda jako při vytváření korekčních dat. Residuální data jsou tedy proložena polynomem. Při prokládání dat je vždy potřeba vybrat takový stupeň polynomu, aby součet čtverců residuí (SSE) byl co nejmenší. Toto prokládání bylo prováděno v modulu *cftool*, kterým disponuje aplikace Matlab.

Po proložení dat polynomem bylo dále nutno data vygenerovaná polynomem "oříznout", protože by okrajové hodnoty zkreslovaly výpočty. U všech vzorků byla uvažována pouze data v intervalu $-46 \leq x \leq 46$.

Celý postup je tedy následující:

1. pro každé měření:
 - načtení dat
 - proložení dat nominální funkcí plochy - získání residuálních dat

- proložení residuálních dat polynomem vysokého řádu
 - vygenerování dat ze získaného polynomu v intervalu $-46 \leq x \leq 46$
 - odstranit informaci o směru odchylky (záporné hodnoty převést na kladné)
2. porovnat získaná data všech měření
- nalézt maximální odchylku
 - vypočítat průměrnou odchylku na vzorku

| měření č. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| SSE [μm] | 8,0 | 6,0 | 7,7 | 6,8 | 7,4 | 7,5 | 6,3 | 6,5 | 7,4 | 5,8 |
| RMSE [μm] | 2,1 | 1,8 | 2,0 | 1,9 | 2,0 | 2,0 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 1,8 |
| max odchylka [μm] | 2,5 | 1,8 | 2,0 | 3,0 | 2,7 | 2,6 | 2,1 | 2,0 | 2,1 | 1,8 |
| prům. odchylka [μm] | 1,0 | 0,7 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 0,8 |

tab. 3 Výsledky testu opakovatelnosti měření

Z dat získaných výpočtem (tab. 3) vyplývá, že nejvyšší odchylka oproti požadovanému tvaru je 3 μm , tento údaj je spíše informativní, protože takový lokální extrém může být způsoben mnohými vnějšími vlivy, navíc, jak je patrné, hodnota mezi jednotlivými měřeními kolísá. Hodnotnější informací pro nás je průměrná odchylka od nominální plochy, ta kolísala mezi 1 a 0,7 μm . Průměrná odchylka byla vypočtena dle vzorce

$$\emptyset\Delta = \frac{\sum_{i=1}^n \text{abs}(\Delta x_i)}{n},$$

kde:

- n počet bodů
- Δx_i odchylka v bodě x_i

Nejpodstatnějším údajem pro nás je, s jakou přesností lze opakovat měření. Proto bylo dále nutno porovnat data jednotlivých měření přímo mezi sebou. Do výpočtu tedy vstupují soubory dat z 10 měření, pojmenujeme si je Y1...Y10. Následně jsou pomocí kombinace bez opakování vybrána vždy 2 měření (tedy [Y1;Y2],[Y1;Y3],..., [Y8;Y10], [Y9;Y10]), to je 45 dvojic. Při použití tohoto postupu a vzorce

$$\text{prum. odchylka mer.} = \frac{\sum_{k=1}^m \frac{\sum_{i=1}^n \text{abs}(Y_i - Y_j)}{n}}{m},$$

kde:

- n počet bodů jednoho měření (pro všechna měření stejný počet)
- Y_i, Y_j dvojice měření zvolených pomocí kombinace bez opakování
- m počet kombinací s opakováním,

bylo zjištěno, že opakovatelnost metody měření, je 0,43 μm .

6.3 Test opakovaného broušení

K testování byl zvolen brusný kotouč s kovovou vazbou a hrubostí 160/125 dle normy ČSN - 224015. Tento nástroj by měl díky kovové vazbě vynikat stálostí tvaru, díky tomu by se do testu nemělo promítat chyba způsobená opotřebením nástroje. Má však velkou hrubost diamantového zrna, které má velký vliv na hrubost povrchu výrobku. Postup při broušení plochy pro tento test byl následovný. Nejprve byla na vzorky vybroušena rovina. Následně byla z této roviny vygenerována sférická plocha s parametry $R=233,7$ a $D=100$. Tento postup byl zvolen proto, aby při opakovaném broušení nebyl výsledek ovlivněn předešlým broušením.

Při pokusu byly použity tyto parametry:

- otáčky nástroje $N_T=1400 \text{ ot./min}$
- otáčky obrobku $N_S=60 \text{ ot./min}$
- rychlost úběru $F=4,9 \text{ mm/min}$
- velikost třísky $S=0,1 \text{ mm}$

Vzhledem k časové náročnosti jednoho cyklu (vybroušení rovinné plochy a následné vybroušení sférické plochy), kdy jeden cyklus trval téměř 5h, bylo pro tento pokus přistoupeno ke snížení počtů vzorků na pět.

Pro tento experiment bylo již využito řídicího kódu pro CNC obsahujícího korekční data. Tato data se shodovala s daty z předchozího pokusu. Proto bylo v rámci tohoto

pokusu možno vyhodnotit nejen opakovatelnost výroby na CNC, ale také možnost opakovaného využití korekčních dat.

V následující tabulce (tab. 4) je pak přehled hodnot SSE, RMSE, maximálních odchylek od nominální tvarové funkce a průměrných odchylek od nominální tvarové funkce, kterých bylo při opakovaném obrábění dosaženo. Dále bylo nutno vypočítat maximální a průměrnou odchylku v bodě. Pro tento výpočet byl použit postup z předchozího experimentu. Tedy proložení residuálních dat polynomem vysokého řádu a následné vyhodnocení získaných dat.

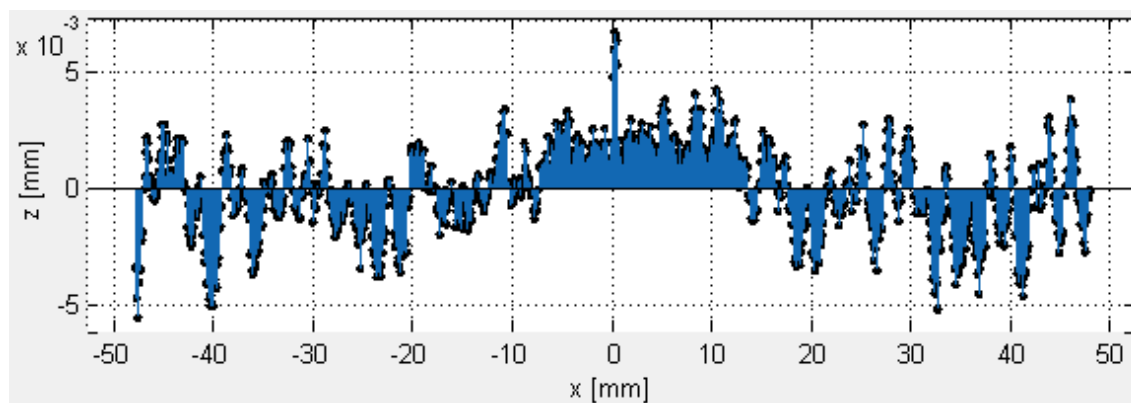
| číslo broušené plochy | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| SSE [μm] | 3,4 | 3,8 | 3,9 | 4,1 | 4,2 |
| RMSE [μm] | 1,9 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,1 |
| max. odchylka [μm] | 2,2 | 2,2 | 2,6 | 2,3 | 2,3 |
| prům. odchylka [μm] | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 1,0 | 1,1 |

tab. 4 Výsledky testu reprodukovatelnosti ploch

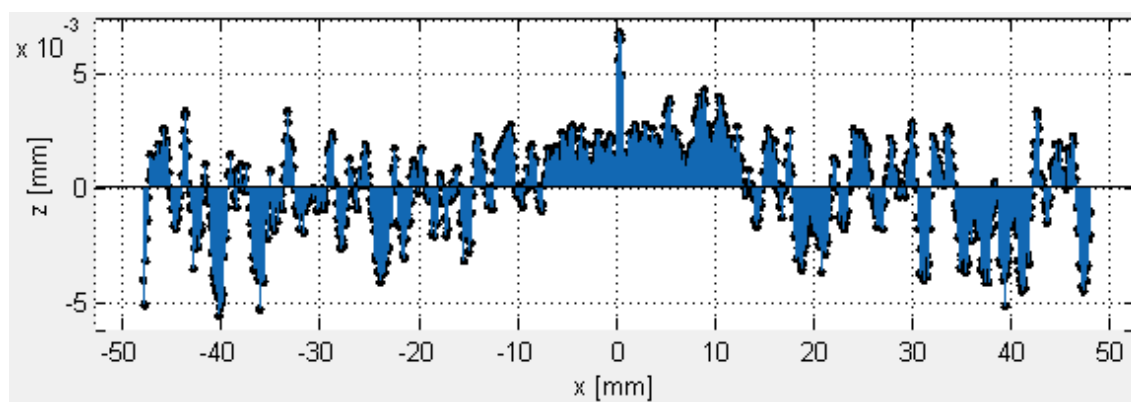
Z tabulky lze vyčíst, že při testu reprodukovatelnosti bylo dosaženo průměrné odchylky 1,04 μm . Vzhledem k použitému obráběcímu nástroji a skutečnosti, že stroj TOS FNG 50 má přesnost polohování udávanou výrobcem 1 μm , lze považovat výsledek tohoto experimentu za přinejmenším uspokojivý.

Na následujících pěti obrázcích jsou znázorněny odchylky od požadovaného tvaru jednotlivých vyrobených ploch. Ve středové části všech pěti obrázků (obr. 29, obr. 30, obr. 31, obr. 32, obr. 33) je přibližně v intervalu $(-7,14)$ na ose x patrná větší struktura odchylek. Ta by, na rozdíl od ostatních píků, znamenajících povrchovou nerovnost, mohla ukazovat na hledanou tvarovou odchylku.

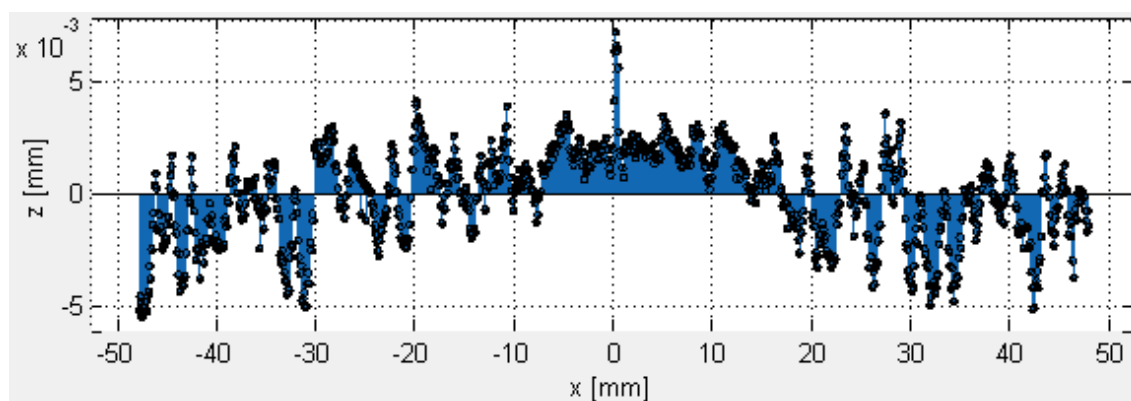
Dále je nutno podotknout, že odchylky patrné z těchto grafů jsou na hraně polohovatelnosti samotného výrobního stroje. S ohledem na tyto poznatky se dá usuzovat, že opakovatelnost procesu broušení je zcela dostačující.



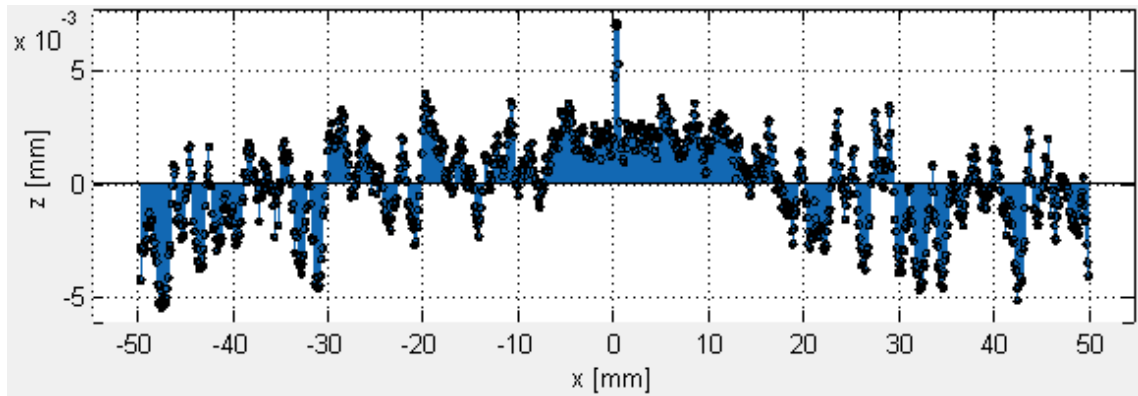
obr. 29 Residuální data 1. broušené plochy



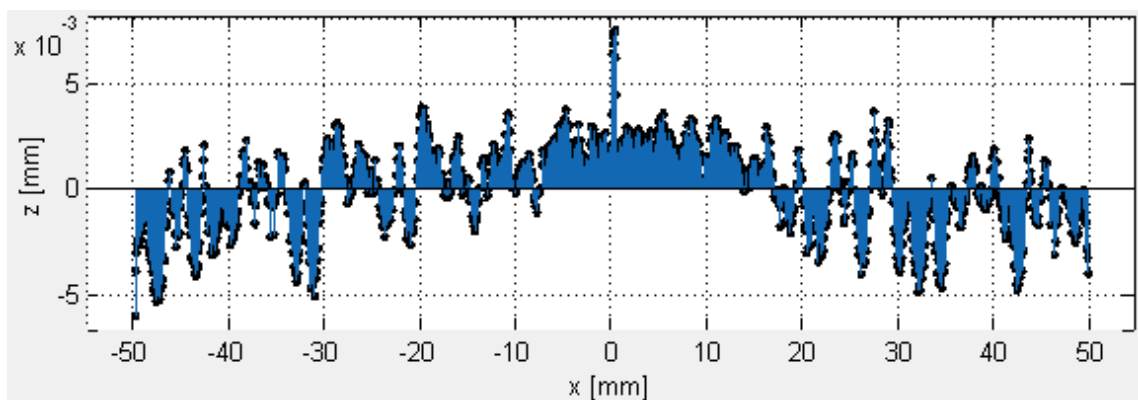
obr. 30 Residuální data 2. broušené plochy



obr. 31 Residuální data 3. broušené plochy



obr. 32 Residuální data 4. broušené plochy



obr. 33 Residuální data 5. broušené plochy

6.4 Testování výroby ploch s různými parametry

Aby bylo možno prohlásit, že tato metoda tvorby korekčních dat je zcela funkční, bylo třeba udělat několik dalších testů na plochách s různým poloměrem křivosti.

6.4.1 Plocha s poloměrem 558,6 mm

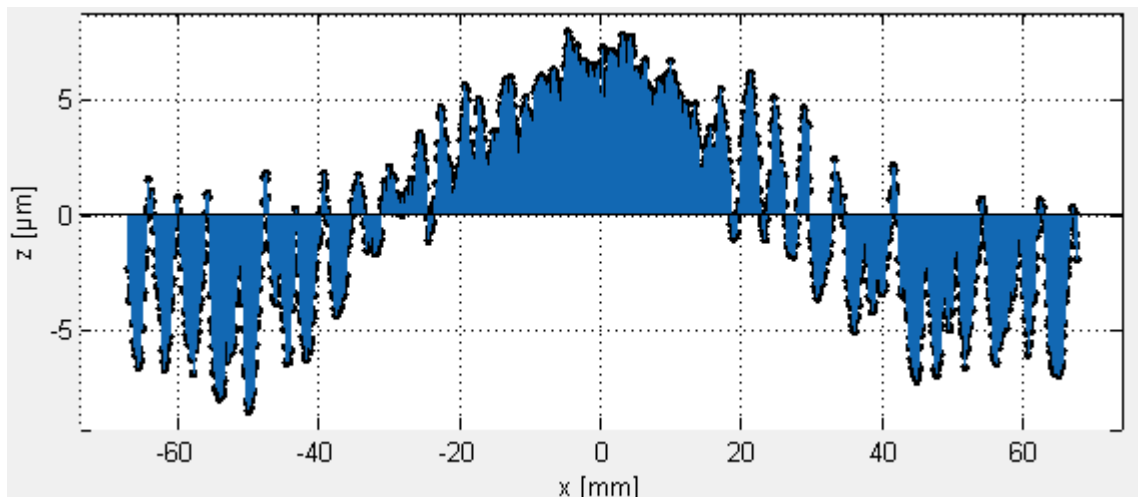
Pro první test byla zvolena plocha a proces s parametry:

- poloměr optické plochy $R=558,6 \text{ mm}$
- průměr vzorku $D=135 \text{ mm}$
- otáčky nástroje $N_T=1400 \text{ ot./min}$
- otáčky obrobku $N_S=30 \text{ ot./min}$ (původně 60 ot./min)

- rychlost úběru $F=4,9 \text{ mm/min}$
- velikost třísky $S=0,1 \text{ mm}$

Během testu bylo zjištěno, že při rychlosti $N_s=60 \text{ ot./min}$ je na povrchu plochy patrné vroubkování v radiálním směru. Proto bylo přistoupeno ke snížení otáček z 60 na 30 ot./min . Po této úpravě podmínek experimentu problém zmizel a bylo možno dále pokračovat.

Po dokončení procesu a změření plochy souřadnicovým měřicím strojem bylo zjištěno, že plocha vykazuje odchylky tvaru znázorněné na obr. 34. Tvarová odchylka je patrná hlavně ve středové oblasti, kde je rozloha opravdu veliká. Cílem korekce by tedy mělo být tuto plochu zmenšit.



obr. 34 Residuální data měřené plochy s poloměrem 558,6 mm před korekcí

Při proložení těchto residuálních dat nebylo nutno data rozdělit na dvě části, protože nedocházelo k velkým odchylkám od zvoleného polynomu. Ale při vytváření korekčních dat byla data vygenerovaná z proloženého polynomu zprůměrována, aby se do korekcí započítala chyba obou polovin obrobku.

Výsledný polynom byl sedmého řádu a byl ve tvaru:

$$f(x) = p1 * x^7 + p2 * x^6 + p3 * x^5 + p4 * x^4 + p5 * x^3 + p6 * x^2 + p7 * x + p8,$$

s parametry:

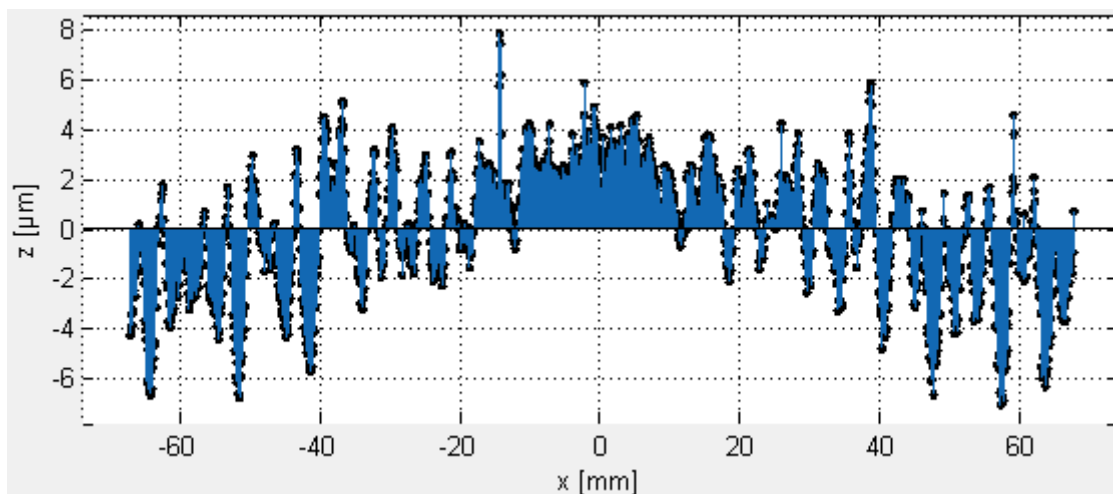
$$p1 = -6.401e-16 \quad p2 = -2.138e-13$$

$$p3 = 2.576e-12 \quad p4 = 2.482e-09$$

$$p5 = 4.588e-09 \quad p6 = -8.82e-06$$

$$p7 = -1.546e-05 \quad p8 = 0.005975$$

Po použití korekčních dat vytvořených z tohoto polynomu a zopakování výrobního procesu, měla výsledná plocha tvarovou odchylku vyobrazenou na obr. 35. Z obr. 36 lze vyčíst, že tvarová odchylka se pohybuje přibližně mezi $-2,5$ a $2,5 \mu\text{m}$. Průměrná odchylka této plochy vyšla $1,5 \mu\text{m}$.

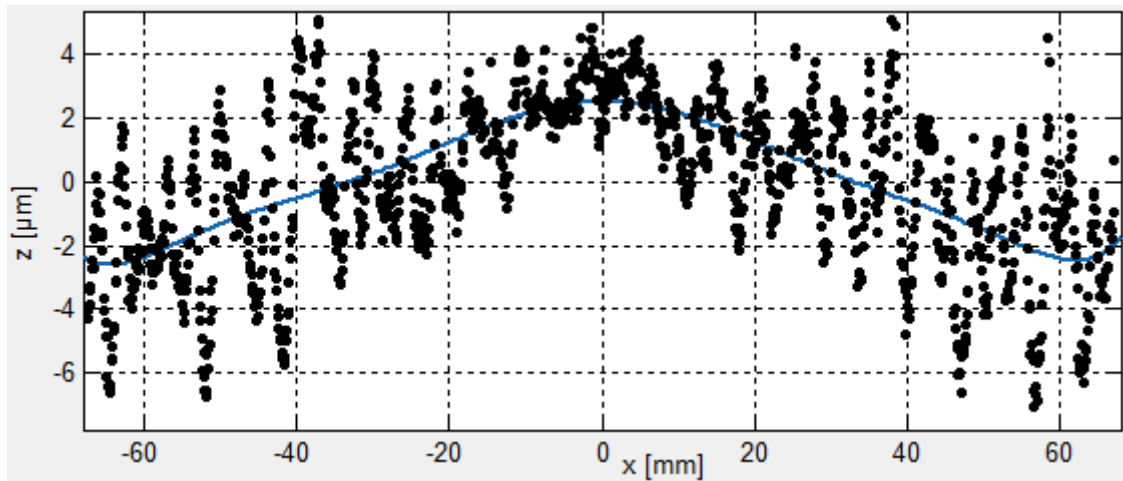


obr. 35 Residua korigované plochy s poloměrem 558,6 mm

Následně byly vyrobeny další dva vzorky se stejnými parametry za stejných výrobních podmínek. V tabulce níže jsou zapsány výsledky tohoto pokusu. Průměrná odchylka na těchto třech vzorcích činila $0,9 \mu\text{m}$.

| pořadí broušené plochy | 1 | 2 | 3 |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|
| SSE [μm] | 8,8 | 3,1 | 4,4 |
| RMS [μm] | 2,6 | 1,5 | 1,8 |
| maximální odchylka [μm] | 4,1 | 4,1 | 4,1 |
| průměrná odchylka [μm] | 1,5 | 0,6 | 0,6 |

tab. 5 Výsledky výroby tří kusů plochy o poloměru 558,6



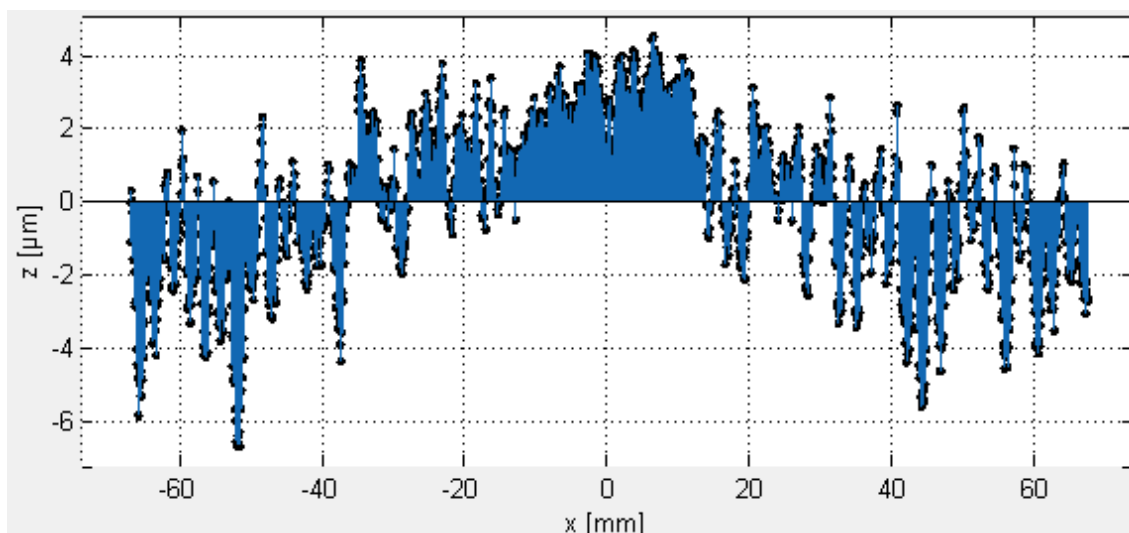
obr. 36 Pro názornost, residua proložena polynomem, který znázorňuje tvar odchylky

6.4.2 Plocha s poloměrem 1002,6 mm

Pro druhý test byla zvolena plocha a proces s parametry:

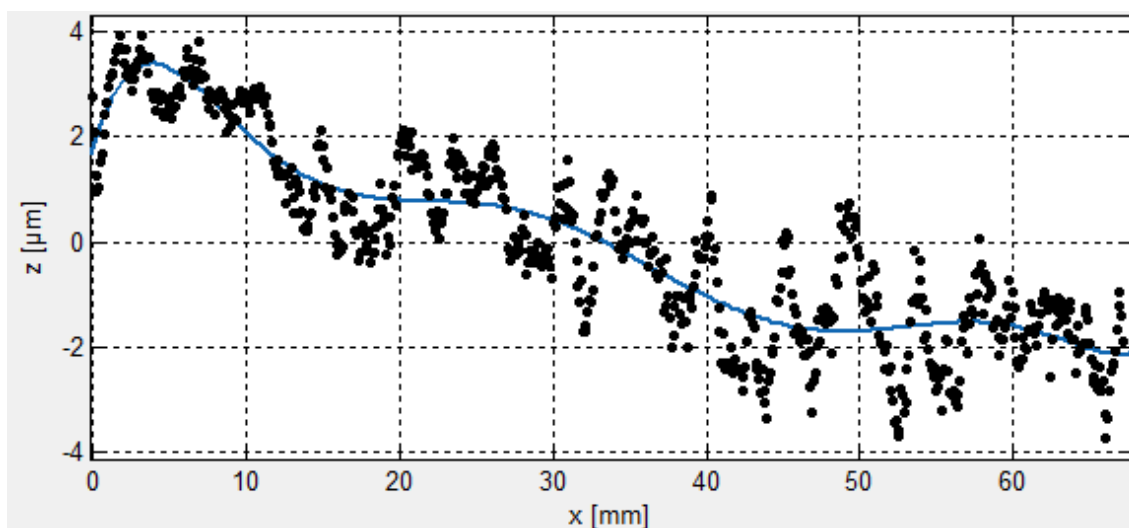
- poloměr optické plochy $R=1002,6 \text{ mm}$
- průměr vzorku $D=135 \text{ mm}$
- otáčky nástroje $N_T=1400 \text{ ot./min}$
- otáčky obrobku $N_S=30 \text{ ot./min}$ (původně 60 ot./min)
- rychlost úběru $F=4,9 \text{ mm/min}$
- velikost třísky $S=0,1 \text{ mm}$

Po dokončení první fáze obrábění (bez korekcí) byl naměřen tvar plochy znázorněný na obr. 37.



obr. 37 Residua vyrobené plochy s poloměrem 1002,6 mm před korekcí ochylky tvaru

Zde je patrné, že stejně jako tomu bylo v případě předchozího pokusu, největší odchylka se na této ploše vygenerovala hlavně ve středové části. V oblasti okolo hodnoty 0 v ose x je pak znatelný pokles této odchylky. Proto bylo nutno data před proložením rozdělit na dvě části ($x \leq 0$ a $x \geq 0$), tato dvojice data zprůměrovat a teprve potom data proložit polynomem vysokého stupně. Výsledné proložení polynomem je zobrazeno na obr. 38.



obr. 38 Proložení residuí polynomem 7. řádu

Parametry proloženého polynomu byly:

$$f(x) = p1 * x^7 + p2 * x^6 + p3 * x^5 + p4 * x^4 + p5 * x^3 + p6 * x^2 + p7 * x + p8$$

kde:

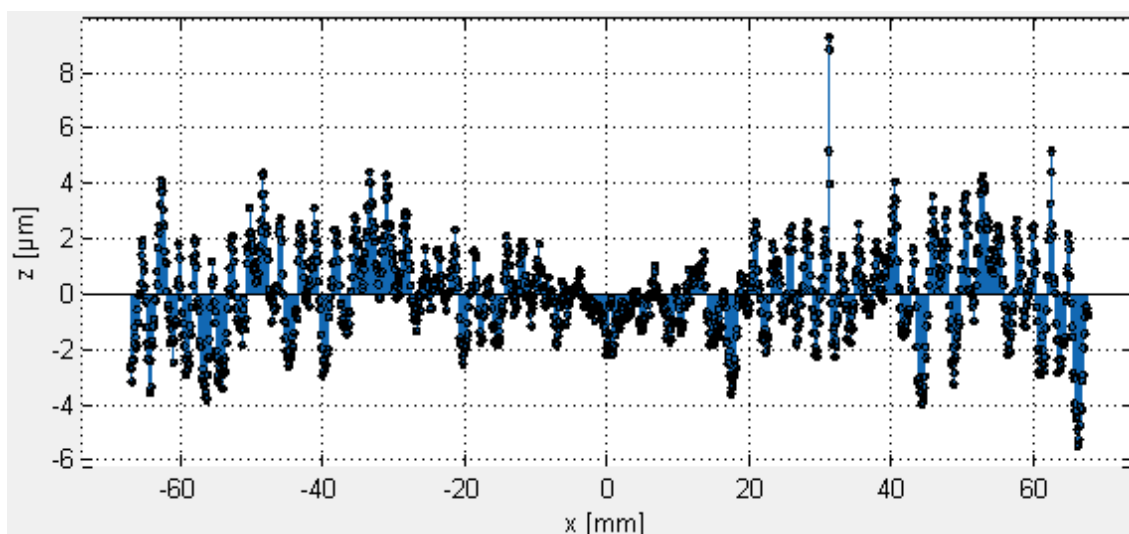
$$p1 = 4.088e-13 \quad p2 = -1.052e-10$$

$$p3 = 1.076e-08 \quad p4 = -5.531e-07$$

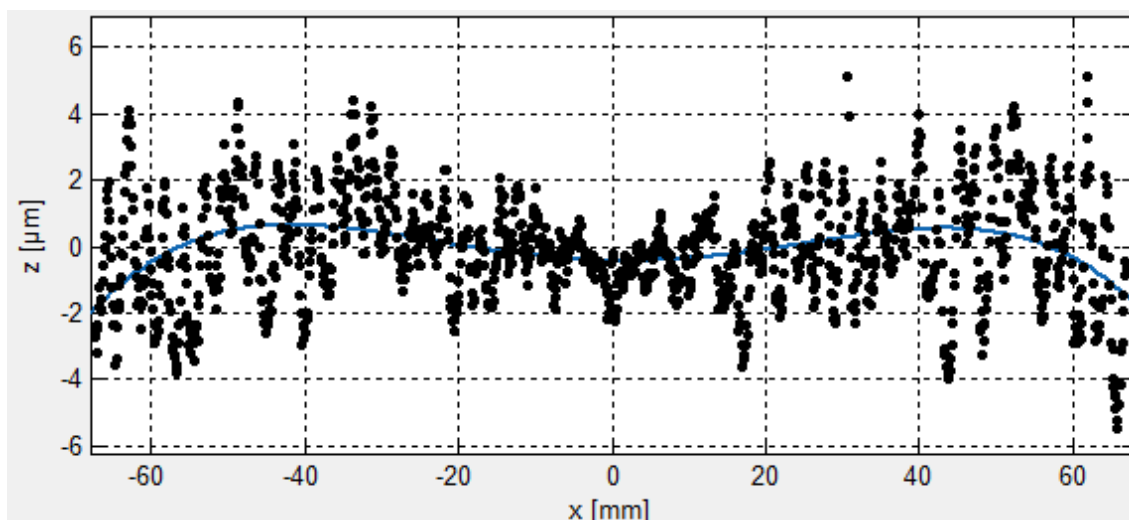
$$p5 = 1.495e-05 \quad p6 = -0.0002007$$

$$p7 = 0.000997 \quad p8 = 0.001772$$

Po aplikování korekčních dat a zopakování procesu bylo naměřeno odchýlení znázorněné na obr. 39.



obr. 39 Residua výsledné korigované plochy s poloměrem 1002,6 mm



obr. 40 Residua výsledné plochy proložena polynomem pro odhalení tvarové odchylky

Výpočtem pak bylo zjištěno, že průměrná odchylka zkorigované plochy činila $0,4 \mu\text{m}$, což byl prozatím nejlepší výsledek, kterého bylo dosaženo v rámci celé práce. V následující tabulce (tab. 6) jsou zapsány údaje této plochy a dvou následujících opakování obráběcího procesu. V tomto pokusu bylo tedy dosaženo na třech vzorcích průměrné odchylky $0,57 \mu\text{m}$.

| pořadí broušené plochy | 1 | 2 | 3 |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|
| SSE [μm] | 3,7 | 3,5 | 3,3 |
| RMS [μm] | 1,7 | 1,6 | 1,6 |
| maximální odchylka [μm] | 2,0 | 5,7 | 5,8 |
| průměrná odchylka [μm] | 0,4 | 0,5 | 0,8 |

tab. 6 Tabulka výsledků výroby tří ploch s poloměrem $1002,6 \text{ mm}$

6.4.3 Vzorek o průměru 320 mm

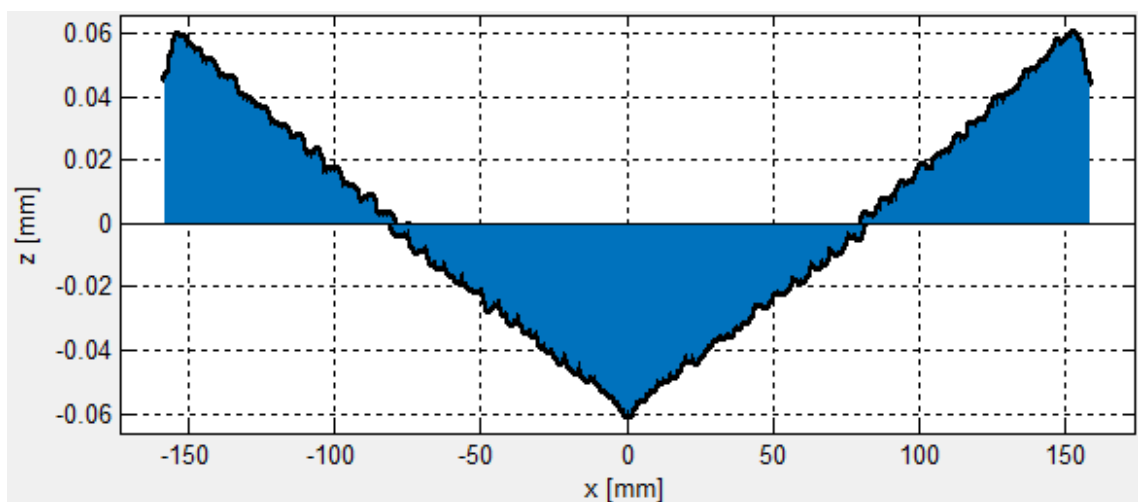
Pro poslední pokus byla zvolena plocha patřící do cílové skupiny, co se týká rozměrů. Vzorek měl totiž průměr $D = 320 \text{ mm}$. Plocha, která na něm měla být vyrobena, nesla nominální hodnotu poloměru $R = 600 \text{ mm}$. Je nutno podotknout, že tento vzorek svými rozměry, hmotností i časovou náročností na výrobu dalece převažuje všechny ostatní použité v celé práci. Ty byly kvůli časové náročnosti a náročnosti na materiál zvoleny mnohem menší.

Již před začátkem procesu bylo automaticky zvoleno pomalejší otáčení vzorku, a to s ohledem na jeho velikost. Na vzorku byl proveden test broušení roviny a test broušení plochy o poloměru $R=600\text{ mm}$. Oba tyto testy byly provedeny vzhledem k časové náročnosti pouze jednou, ale vzhledem k výsledkům reprodukovatelnosti a všech předchozích pokusů, kdy stroj dosahoval velmi dobré přesnosti opakování, je možné říci, že při opakování výroby bychom dostali velice podobné výsledky.

Rovinná plocha

První proces měl tedy parametry:

- poloměr optické plochy $R=99999999\text{ mm}$
- průměr vzorku $D=320\text{ mm}$
- otáčky nástroje $N_T=1400\text{ ot./min}$
- otáčky obrobku $N_S=15\text{ ot./min}$
- rychlost úběru $F=4,9\text{ mm/min}$
- velikost třísky $S=0,1\text{ mm}$



obr. 41 Residua broušené rovinné plochy bez korekcí

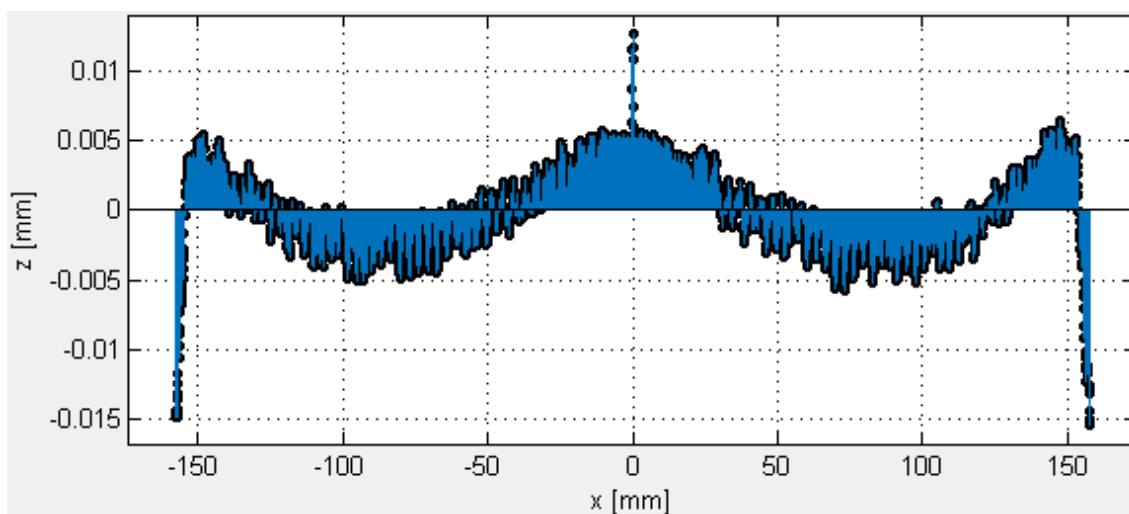
Po dokončení prvotního obrábění (obr. 41) bylo dosaženo průměrné odchylky 29,4 μm . Pro získání korekčních dat bylo v tomto případě nutno data rozdělit, zprůměrovat a následně proložit polynomem. Výsledný polynom byl ve tvaru

$$f(x) = p1 * x^9 + p2 * x^8 + p3 * x^7 + p4 * x^6 + p5 * x^5 + p6 * x^4 + p7 * x^3 + p8 * x^2 + p9 * x + p10,$$

kde:

$$\begin{aligned} p1 &= -1.581\text{e-}18 & p2 &= 1.043\text{e-}15 \\ p3 &= -2.864\text{e-}13 & p4 &= 4.232\text{e-}11 \\ p5 &= -3.643\text{e-}09 & p6 &= 1.843\text{e-}07 \\ p7 &= -5.25\text{e-}06 & p8 &= 7.505\text{e-}05 \\ p9 &= 0.0003011 & p10 &= -0.05713 \end{aligned}$$

Po použití korekčních dat a následném přebroušení plochy bylo provedeno další měření na souřadnicovém měřicím stroji. Na optické ploše (obr. 42) po korigování chyby bylo dosaženo průměrné odchylky 2,4 μm . Tedy došlo ke zlepšení o jeden řád.



obr. 42 Residua získaná měřením výsledné rovinné plochy

Následuje tabulka výsledků tohoto pokusu, kde jsou vyobrazeny výsledky plochy před korekcí a po korekci.

| plocha | bez korekce | s korekcí |
|-------------------------|-------------|-----------|
| SSE [mm] | 3,6082 | 0,032 |
| RMS [mm] | 0,0341 | 0,0032 |
| maximální odchylka [mm] | 0,0549 | 0,0068 |
| průměrná odchylka [mm] | 0,0294 | 0,0024 |

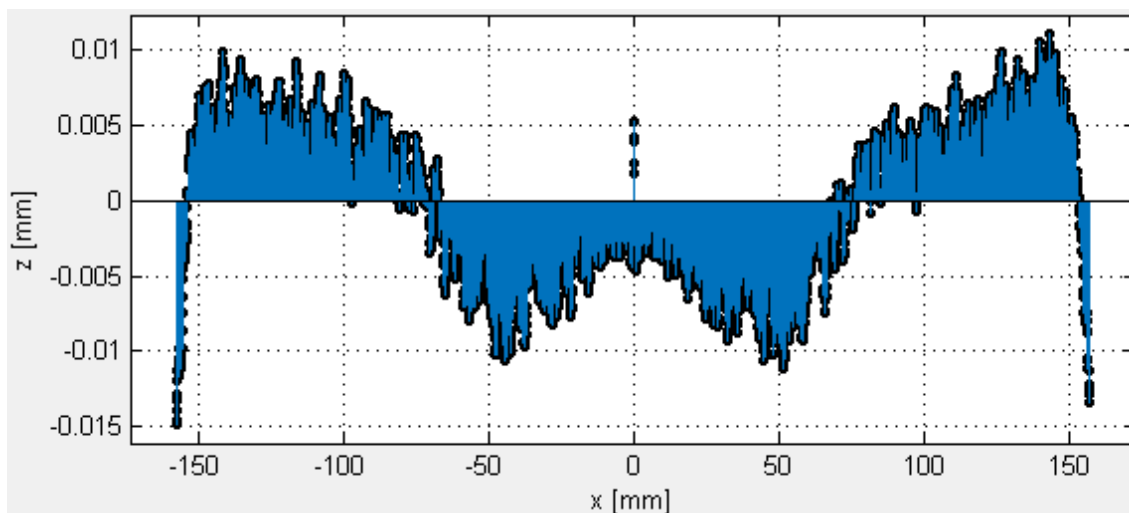
tab. 7 Porovnání výsledků broušení bez a s korekcí chyby

Plocha s poloměrem 600 mm

V druhé části tohoto pokusu byla vyráběna plocha s poloměrem $R=600\text{ mm}$.

Proces měl tedy parametry:

- poloměr optické plochy $R=600\text{ mm}$
- průměr vzorku $D=320\text{ mm}$
- otáčky nástroje $N_T=1400\text{ ot./min}$
- otáčky obrobku $N_S=15\text{ ot./min}$
- rychlost úběru $F=4,9\text{ mm/min}$
- velikost třísky $S=0,1\text{ mm}$



obr. 43 Residua na ploše s poloměrem 600 mm před korekcí

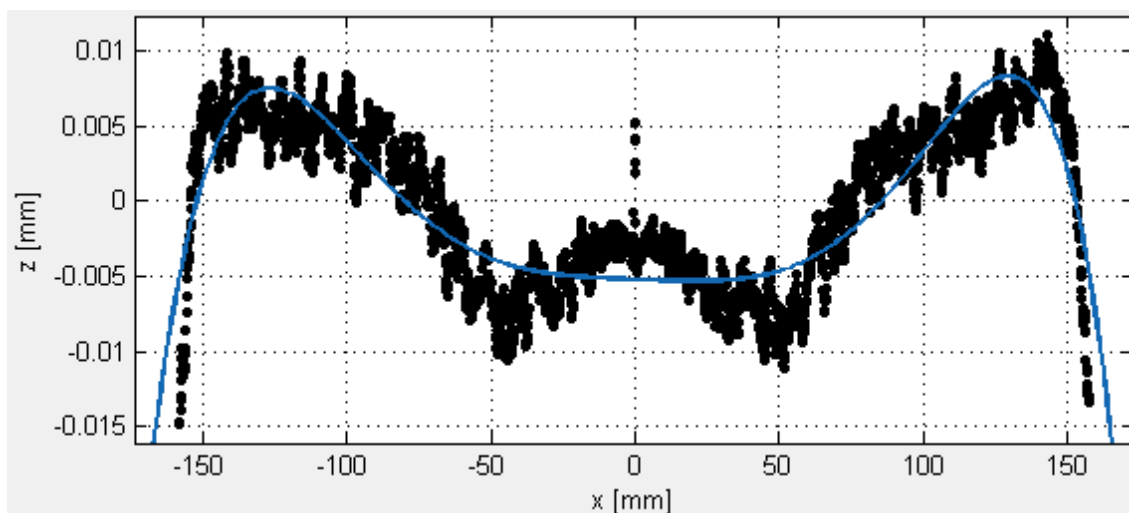
Jak je patrné z obr. 43 znázorňujícího výsledek procesu, odchylky před korekcí byly mimořádně velké a profil tvarové odchylky byl velmi členitý. Průměrná odchylka činila 4,3 μm .

V následujícím kroku bylo tedy nutno vytvořit korekční data. Tato plocha byla zvolena jako příhodná (vzhledem k tvaru residuů) pro demonstrování výsledku při volbě chybné metody proložení dat. Tedy při první tvorbě korekčních dat nebyla data rozdělena. Při přímém proložení těchto residuů (obr. 44) polynomem došlo k velkým rozdílům oproti residuálním datům. Parametry polynomu, kterým byla data chybně proložena:

$$f(x) = p1 * x^9 + p2 * x^8 + p3 * x^7 + p4 * x^6 + p5 * x^5 + p6 * x^4 + p7 * x^3 + p8 * x^2 + p9 * x + p10$$

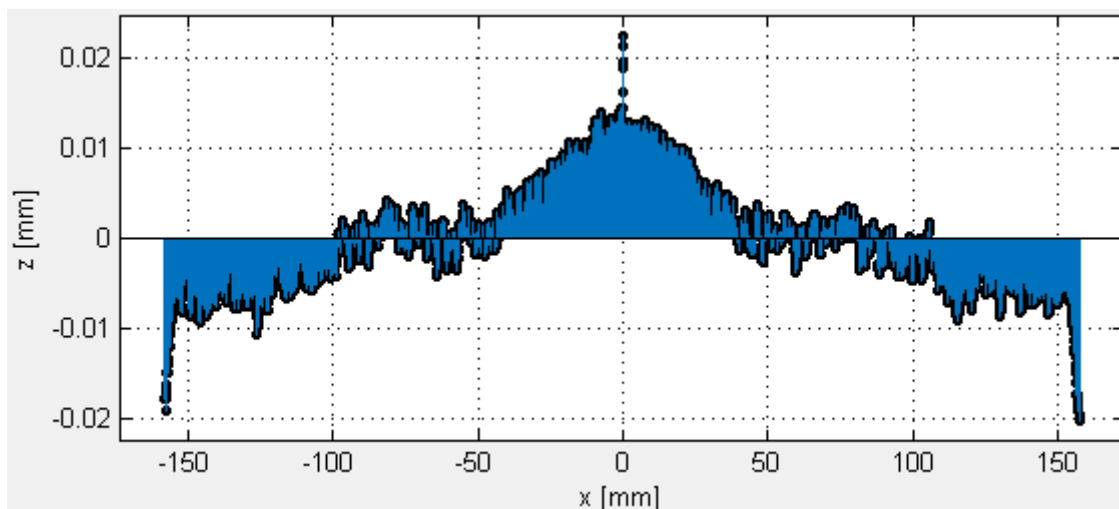
kde:

$$\begin{array}{ll} p1 = 3.611\text{e-}23 & p2 = 1.455\text{e-}20 \\ p3 = -7.331\text{e-}18 & p4 = -6.089\text{e-}15 \\ p5 = 2.14\text{e-}13 & p6 = 1.401\text{e-}10 \\ p7 = -1.092\text{e-}09 & p8 = 7.44\text{e-}08 \\ p9 = -6.864\text{e-}06 & p10 = -0.005219 \end{array}$$



obr. 44 Ukázka následků chybného postupu při tvorbě korekčních dat

Pro názornost, byla plocha těmito daty korigována. Jak je patrné na obr. 45, tato korekční data tvarovou odchylku naopak zhoršila, což bylo znát dokonce i na průměrné odchylce, která v tomto případě byla $4,6 \mu\text{m}$, tedy o $0,3 \mu\text{m}$ vyšší než před korekcí.



obr. 45 Rezidua výsledné plochy po užití chybně vytvořených korekčních dat

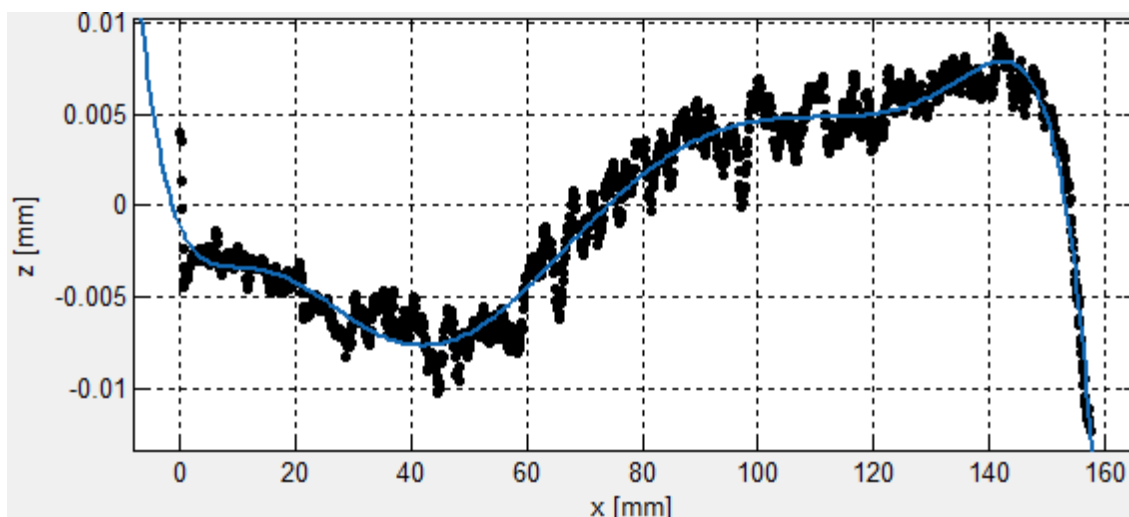
Správným postupem tedy bylo data rozdělit na dvě části ($x \leq 0$ a $x \geq 0$). Tato data následně zprůměrovat a následně je proložit polynomem. Tedy jak je to znázorněno na obr. 46, z něhož je patrné, že odchylky polynomu od dat samotných jsou takřka minimální.

Data tedy byla proložena polynomem:

$$f(x) = p1 * x^9 + p2 * x^8 + p3 * x^7 + p4 * x^6 + p5 * x^5 + p6 * x^4 + p7 * x^3 + p8 * x^2 + p9 * x + p10$$

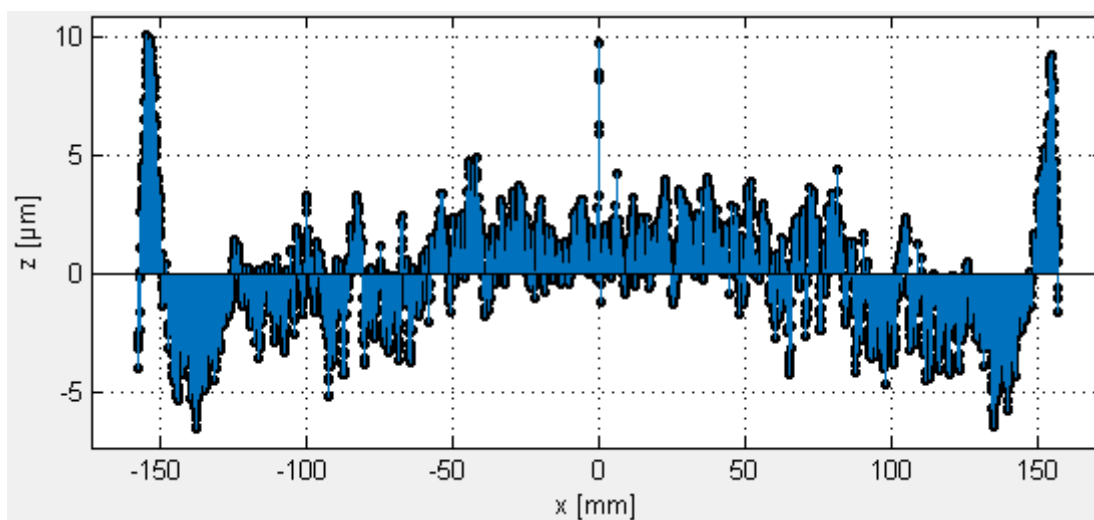
kde:

| | |
|--------------------------|-------------------------|
| $p1 = -8.772\text{e-}19$ | $p2 = 6.157\text{e-}16$ |
| $p3 = -1.849\text{e-}13$ | $p4 = 3.076\text{e-}11$ |
| $p5 = -3.049\text{e-}09$ | $p6 = 1.793\text{e-}07$ |
| $p7 = -5.857\text{e-}06$ | $p8 = 9.473\text{e-}05$ |
| $p9 = -0.0007372$ | $p10 = -0.001181$ |



obr. 46 Ukázka správně upravených dat pro prokládání

Po aplikování tohoto polynomu na vytvoření korekčních dat a následném zopakování procesu s těmito korekčními daty bylo dosaženo výsledku znázorněného na obr. 47. Zde je patrné, že došlo k výraznému zredukovaní velkých ploch značících tvarovou odchylku. Tato zkorigovaná plocha dosáhla průměrné odchylky $1,3 \mu\text{m}$.



obr. 47 Výsledná plocha po užití postupu dělení dat při tvorbě korekcí

| plocha | bez korekce | s chybnou korekcí | se správnou korekcí |
|-------------------------|-------------|-------------------|---------------------|
| SSE [mm] | 0,0946 | 0,1098 | 0,0185 |
| RMS [mm] | 0,0055 | 0,0059 | 0,0024 |
| maximální odchylka [mm] | 0,0083 | 0,0096 | 0,0073 |
| průměrná odchylka [mm] | 0,0043 | 0,0046 | 0,0013 |

tab. 8 Tabulka výsledků testu výroby plochy o poloměru 600 mm na vzorku o průměru 320 mm

6.5 Vady odhalené při testování

Během jednotlivých dílčích experimentů byl pozorován opakující se profil tvarové odchylky. U nerovinných ploch je tento tvar mírně deformovaný zahnutím dráhy nástroje. Ale velice dobře se dá pozorovat na rovinných plochách.

Po delším zkoumání problému byl tento jev připsán konstantním otáčkám obrobku. U strojů specializovaných na tento typ výroby optických elementů jsou otáčky obrobku měněny v závislosti na radiální vzdálenosti od středu obrobku.

Jak je patrné na testech broušení roviny, se zvyšující se radiální vzdáleností od středu se téměř lineárně zvyšuje také odchylka od tvaru. Konstrukční řešení motoru, který otáčí obrobkem, nedovoluje měnit jeho otáčky při běžícím procesu. Proto navrhovaným řešením tohoto problému by byla volba jiného motoru schopného změny rychlosti otáčení za běhu.

Druhým faktem, který hovoří ve prospěch výměny hnacího zařízení, je také jeho nízká spolehlivost, často docházelo k problémům, které znemožňovaly na delší dobu funkčnost a vyžadovaly dlouhodobější opravy.

Závěr

Cílem práce bylo otestovat funkčnost řešení obráběcího procesu, navrženého v předchozí práci, na sérii vzorků. Následně vyvinout metodu měření a zpracování dat tak, aby bylo možné data vyhodnotit a využít je, jako zdroj korekčních dat pro potlačení odchylky vznikající v procesu.

Nejprve bylo provedeno zhodnocení možných úprav dat. S ohledem na charakter zpracovávaných dat a charakter informace (o tvaru optické plochy), která měla být z těchto dat získána, byla vybrána metoda prokládání dat polynomem, jako nejlepší varianta. Následně byl vytvořen postup úpravy dat, pomocí něhož je možno vytvořit data sloužící ke korigování tvarové odchylky optické plochy. Tento postup měření a úpravy dat byl následně testován.

V rámci prvotního testování bylo zjištěno, že v samotném procesu bylo několik chyb (softwarových i hardwarových). Chyby softwarového typu se podařilo vyřešit. Chyby hardwarové by vyžadovaly větší zásah do konstrukce stroje, což z časových důvodů nebylo na místě. Dále bylo při testovací výrobě provedeno vyhodnocení opakovatelnosti měření. V rámci tohoto experimentu byla vyrobena optická plocha. Na této ploše bylo provedeno opakované měření tvaru pomocí souřadnicového měřicího stroje Mitutoyo Legex 774. Data tohoto měření (deset sad) byla následně vyhodnocena. Z cca 45 tisíc hodnot bylo vypočítáno, že průměrná odchylka na deseti sadách dat činila 0,43 μm .

Dalším experimentem byl test reprodukovatelnosti výrobku. Během testu bylo vyrobeno pět totožných ploch. Vyrobené plochy byly následně změřeny a data z těchto měření vyhodnocena. Při vyhodnocení bylo zjištěno, že průměrná odchylka všech pěti vyrobených ploch se pohybuje mezi 0,9 a 1,1 μm .

Poslední experiment byl zaměřen na skutečnou výrobu. Cílem bylo otestovat navržené postupy v reálné výrobě. V rámci testu byly vyrobeny tři série optických ploch různých parametrů. Při vyhodnocení bylo zjištěno, že průměrná odchylka činila přibližně 1 μm , což splnilo prvotní požadavky, kterými bylo dosažení průměrné odchylky 3 μm . Za předpokladu, že by byl použit obráběcí nástroj s jemnějším brusným zrnem, by se tato přesnost mohla teoreticky ještě nepatrně zvýšit.

Citovaná literatura

- [1]. **Janíčková, Petra.** Moderní konstrukční řešení. [Online] 2010. [Citace: 12. 4 2016.] <http://www.uh.cz/szegsm/files/sblizovani/pdf/mod-konstr-cnc.pdf>.
- [2]. Co je CNC, jak funguje a z čeho se skládá? [Online] 9. 12 2013. [Citace: 12. 4 2016.] <http://mlgeardesigns.blog.cz/1312/co-je-cnc-jak-funguje-a-z-ceho-se-sklada>.
- [3]. **Meloun, Milan a Militký, Jiří.** *Statistická analýza experimentálních dat*. Praha : Academia, 2004. ISBN 80-200-1254-0.
- [4]. **Michal, Friesl.** Metoda nejmenších čtverců. *Pravděpodobnost a statistika HYPERTEXTOVĚ*. [Online] 27. 6 2003. [Citace: 12. 4 2016.] <http://home.zcu.cz/~friesl/hpsb/mnc.html>.
- [5]. **Porat, Boaz.** *A Course in Digital Signal Processing*. New York : Wiley & Sons, 1997. ISBN 10: 0471149616.
- [6]. **Smékal, Zdeněk a Vích, Robert.** *Číslíkové filtry*. Praha : Academia, 2001. ISBN 80-200-0761-X.
- [7]. Čebyševovy polynomy a interpolace. [Online] 3. 12 2006. [Citace: 12. 4 2016.] <http://veda-technika.blogspot.cz/2006/12/ebyevovy-polynomy-interpolace.html>.
- [8]. **Rutrlé, Miloš.** *Brylová optika*. Brno : Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 1993. ISBN 80-7013-145-4.
- [9]. **Derryll, Meister.** Ophtalmic Lens Design: Aspheric Lens Design. *Opticampus.com*. [Online] [Citace: 12. 4 2016.] http://www.opticampus.com/cecourse.php?url=lens_design/.
- [10]. **Hans, Tiziani, Rudiger, Hentschel a Bernhard, Braunecker.** *Advanced Optics Using Aspherical Elements*. Texas : SPIE Press, 2007. ISBN: 9780819467492.
- [11]. Specifikace diamantového brusného kotouče. *Minnich.cz*. [Online] [Citace: 12. 4 2016.] <https://www.minnich.cz/inpage/specifikace-diamantoveho-brusneho-kotouce/>.
- [12]. **Matoušek, Ondřej, a další, a další.** Influence of the circumferential speed of a resin bond grinding wheel on the properties of a ground aspheric surface. [Online]

2014. [Citace: 12. 4 2016.]
<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2089608&resultClick=1>.
- [13]. **Shafir, Shai N.** Diamond Tool Wear - Observation by Scanning Electron Microscopy (SEM). [Online] [Citace: 12. 4 2016.]
<http://www.optics.rochester.edu/workgroups/cml/opt307/spr04/shai/index.html>.
- [14]. SpecGAGE 3D. *3D-Shape.com*. [Online] [Citace: 12. 4 2016.] http://www.3d-shape.com/produkte/pmd_d.php.
- [15]. **Srinivasan, V., Liu, H. C. a Halioua, M.** Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects. *osapublishing.org*. [Online] OSA Publishing, 1984. [Citace: 12. 4 2016.]
<https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-23-18-3105>.
- [16]. **Hošek, Jan.** Měření kvality asférických optických ploch. *JMO - Jemná mechanika a optika*. 2/2006.
- [17]. Souřadnicové měřicí stroje. [Online] [Citace: 12. 4 2016.]
http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/rp1_skripta.pdf.
- [18]. Stylus profiler. *Photonics Group*. [Online] [Citace: 12. 4 2016.] http://www-old.wemif.pwr.wroc.pl/photonicsgroup/?page_id=54.
- [19]. **Tichá, Šárka.** *Strojírenská metrologie*. Ostrava : VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 978-80-248-1209-0.
- [20]. **Mitutoyo.** Coordinate Measuring Machines: LEGEX 500/700/900/1200. [Online] 2013. [Citace: 12. 4 2016.]
http://www.mitutoyo.com/Images/003/316/2099_LEGEX.pdf.
- [21]. **Renishaw.** PH10 motorised indexing heads. [Online] 2012. [Citace: 12. 4 2016.]
<http://www.renishaw.com/en/ph10-motorised-indexing-heads--6684>.

A. Příklad souboru s naměřenými daty ze stroje Mitytoyo Legex 774

#00:GEOPAK-WIN Scanning

#02:kontura1

#04:ZX(Y)

#05:Opn

#06:MM

#07:0.00000

| | | | | | | |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| #12: | -5.26660 | 49.10474 | 0.00171 | -0.20604 | 0.00000 | -0.97854 |
| #12: | -5.24334 | 48.99580 | -0.01031 | -0.21156 | 0.00000 | -0.97737 |
| #12: | -5.22076 | 48.89286 | -0.01031 | -0.21417 | 0.00000 | -0.97680 |
| #12: | -5.20119 | 48.80366 | 0.00972 | -0.20975 | 0.00000 | -0.97775 |
| #12: | -5.18374 | 48.72050 | 0.00328 | -0.20240 | 0.00000 | -0.97930 |
| #12: | -5.16467 | 48.62671 | -0.01082 | -0.20029 | 0.00000 | -0.97974 |
| #12: | -5.14346 | 48.52346 | 0.00000 | -0.20287 | 0.00000 | -0.97921 |
| #12: | -5.12321 | 48.42651 | 0.00608 | -0.20239 | 0.00000 | -0.97930 |
| #12: | -5.10371 | 48.33115 | 0.00622 | -0.20104 | 0.00000 | -0.97958 |
| #12: | -5.08151 | 48.22345 | 0.00385 | -0.20584 | 0.00000 | -0.97859 |
| #12: | -5.06090 | 48.12753 | 0.00625 | -0.20467 | 0.00000 | -0.97883 |
| #12: | -5.04286 | 48.03873 | 0.00505 | -0.19980 | 0.00000 | -0.97984 |
| #12: | -5.02303 | 47.94166 | 0.00515 | -0.19915 | 0.00000 | -0.97997 |
| #12: | -5.00012 | 47.82866 | 0.00426 | -0.20622 | 0.00000 | -0.97851 |
| #12: | -4.97540 | 47.71565 | 0.00203 | -0.21365 | 0.00000 | -0.97691 |
| #12: | -4.95596 | 47.62658 | 0.00394 | -0.20879 | 0.00000 | -0.97796 |
| #12: | -4.93661 | 47.53395 | 0.00220 | -0.20612 | 0.00000 | -0.97853 |
| #12: | -4.91577 | 47.43575 | 0.00293 | -0.20608 | 0.00000 | -0.97854 |
| #12: | -4.89688 | 47.34539 | 0.00235 | -0.20143 | 0.00000 | -0.97950 |
| #12: | -4.87578 | 47.24125 | 0.00377 | -0.20427 | 0.00000 | -0.97891 |
| #12: | -4.85209 | 47.13090 | 0.00396 | -0.21023 | 0.00000 | -0.97765 |
| #12: | -4.83189 | 47.03704 | 0.00349 | -0.20676 | 0.00000 | -0.97839 |
| #12: | -4.81353 | 46.94857 | 0.00376 | -0.20166 | 0.00000 | -0.97946 |
| #12: | -4.79591 | 46.86237 | 0.00229 | -0.19515 | 0.00000 | -0.98077 |
| #12: | -4.77849 | 46.77238 | 0.00269 | -0.19087 | 0.00000 | -0.98162 |
| #12: | -4.75332 | 46.64437 | 0.00295 | -0.20551 | 0.00000 | -0.97865 |
| #12: | -4.73074 | 46.54388 | -0.00064 | -0.20679 | -0.00000 | -0.97839 |
| #12: | -4.71386 | 46.45777 | 0.00006 | -0.20017 | 0.00000 | -0.97976 |
| #12: | -4.69281 | 46.35802 | -0.00006 | -0.20059 | 0.00000 | -0.97967 |
| #12: | -4.67661 | 46.27627 | -0.00062 | -0.19227 | 0.00000 | -0.98134 |
| #12: | -4.65700 | 46.17482 | -0.00040 | -0.19323 | 0.00000 | -0.98115 |
| #12: | -4.63523 | 46.06623 | 0.00188 | -0.19836 | -0.00000 | -0.98013 |
| #12: | -4.61644 | 45.97435 | -0.00004 | -0.19512 | 0.00000 | -0.98078 |
| #12: | -4.59512 | 45.86457 | -0.00195 | -0.19954 | -0.00000 | -0.97989 |
| #12: | -4.57420 | 45.76652 | -0.00107 | -0.19963 | -0.00000 | -0.97987 |
| #12: | -4.55686 | 45.67683 | -0.00157 | -0.19510 | -0.00000 | -0.98078 |
| #12: | -4.53478 | 45.56844 | -0.00122 | -0.19919 | 0.00000 | -0.97996 |
| #12: | -4.51341 | 45.46302 | -0.00148 | -0.20232 | 0.00000 | -0.97932 |

...

B. Obsah přiloženého CD

- text diplomové práce ve formátu PDF
- naměřená data strojem Mitutoyo Legex 774
- aplikace LensGEN včetně zdrojových kódů